

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

Фізико-Технічний Інститут

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра прикладної фізики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Монастирський Г.Є.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

зі спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали

на тему : Методика юстування проекційного модуля оптичної системи

Виконав студент 4 курсу, групи ФФ-91

Карабан Артем Олексійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник: доцент, к.т.н. Іванова В.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант: провідний спеціаліст підприємства «ЮА.РПА»

Марченко А.Ф.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент: ст. викладач каф. ІБ Василенко О.Д

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у даній дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань

Студент: Карабан А.О.

(підпис)

**Київ – 2023 рік**

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

Фізико-технічний інститут  
Кафедра Прикладної фізики

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Завідувач кафедри

Монастирський Г.Є.  
підпис ініціали прізвище

«      »            2023 р

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломну роботу студенту**  
Карабану Артему Олексійовичу  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: Методика юстування проекційного модуля оптичної системи

Керівник: доцент, к.т.н. Іванова В.В.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджені наказом по університету від «26» червня 2023 р. № 2028с.

2. Термін подання студентом роботи 12.06.2023

3. Вихідні дані до роботи: геометричні параметри проекційного модуля оптичної системи приладу прицілювання, що складається з трьох призм АР-90, нахили яких можна контролювати, використовуючи прокладки товщиною 1-100 мкм, і двох лінз.

4. Об'єкт дослідження: проекційний модуль приладу прицілювання.
5. Предмет дослідження: вплив відхилення від номінального положення оптичних елементів проекційного модуля внаслідок його роз'юстування.
6. Перелік завдань, які потрібно зробити: виміряти геометричні параметри проекційного модуля деякого приладу прицілювання та положення його оптичних елементів, побудувати оптичну схему модуля та його схематичну розгортку, підібрати методики для експериментального знаходження фокусних відстаней і положення головних площин у лінз, розрахувати залежність відхилення по осях зображення в фокальній площині окуляра від нахилів призм в процесі юстування, порахувати як залежать кути нахилів від товщини використаних прокладок.
7. Зміст роботи: Реферат, вступ, огляд досліджуваного приладу прицілювання і модулів відповідальних за його юстування та літератури, пошук методики дослідження параметрів досліджуваних лінз, опис отриманих результатів, висновки по роботі.
8. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація — 11 слайдів.
9. Перелік публікацій: XXI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, Методика юстування проекційного модуля оптичної системи.
10. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата      |                     |
|--------|-------------------------------------------|-------------------|---------------------|
|        |                                           | завдання<br>видав | завдання<br>прийняв |
| 1      | провідний спец. «ЮА.РПА» Марченко А.Ф.    | 28.06.2022        | 29.05.2023          |
| 2      | провідний спец. «ЮА.РПА» Марченко А.Ф.    | 28.06.2022        | 10.06.2023          |

11. Дата видачі завдання 28 червня 2022 р.

### Календарний план

| №, з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи     | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|--------|---------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1      | Постановка мети та завдання дослідження     | 25.08.2022-17.10.2022          | Виконано |
| 2      | Вимірювання параметрів проекційного модуля  | 18.10.2022-21.12.2022          | Виконано |
| 3      | Розрахунки системи трьох призм              | 22.12.2022-30.03.2023          | Виконано |
| 4      | Підготовка тез до конференції               | 01.04.2023-14.05.2023          | Виконано |
| 5      | Виступ на конференції                       | 14.05.2023                     | Виконано |
| 6      | Дослідження невідомих параметрів лінз       | 15.05.2023-22.05.2023          | Виконано |
| 7      | Аналіз отриманих даних і кінцеві розрахунки | 23.05.2023-31.05.2023          | Виконано |
| 8      | Написання висновків                         | 01.06.2023-7.06.2023           | Виконано |
| 9      | Підготовка доповіді та презентації          | 8.06.2023-11.06.2023           | Виконано |
| 10     | Подання роботи на перевірку на плагіат      | 12.06.2023                     | Виконано |
| 11     | Подання роботи на рецензування              | 12.06.2023                     | Виконано |
| 12     | Подання роботи до захисту                   | 12.06.2023                     | Виконано |

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Карабан А.О.

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Іванова В.В.

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи за обсягом становить 52 сторінок основного тексту, 16 рисунків та 3 таблиць. Для дослідження було використано 13 бібліографічних найменувань.

**Темою роботи** є методика юстування проекційного модуля оптичної системи.

**Метою роботи** є розробка методичних вказівок щодо юстування проекційного модуля шляхом змінення кутів нахилу його призм.

**Об'єктом дослідження** є проекційний модуль приладу прицілювання.

**Предметом дослідження** є оцінка впливу відхилення від номінального положення оптичних елементів проекційного модуля внаслідок його роз'юстування.

**Ключові слова:** *прилад прицілювання, проекційний модуль, юстування, призма, електронно-оптичний перетворювач, фокусна відстань, головна площинна, відхилення зображення, методика.*

## SUMMARY

The diploma work explanatory note includes 52 pages of the main text, 16 figures and 3 tables. In the problem of modern analysis, overall 13 references were used.

**The topic** of this study is the alignment methodology of the optical system in a projection module.

**The aim** of the study is to develop guidelines for aligning the projection module by adjusting

**The object** of research is the projection module of an aiming device.

**The subject** of the study is the assessment of the impact caused by the misalignment of optical elements in the projection module from their nominal positions.

**Key words:** *aiming device, projection module, alignment, prism, electro-optical transducer, focal distance, principal plane, image deviation, methodology.*

## ЗМІСТ

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                                              | 8  |
| РОЗДІЛ 1. БУДОВА ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПРИЛАДУ ПРИЦІЛЮВАННЯ,<br>ОСНОВНІ МОДУЛІ ТА ЗАДАЧІ ЮСТУВАННЯ .....                      | 10 |
| 1.1 Прилад прицілювання і його проекційний модуль.....                                                                   | 10 |
| 1.2 Модуль ЕОП .....                                                                                                     | 11 |
| 1.3 Процес повернення приладу прицілювання в робочий стан .....                                                          | 14 |
| 1.4 Юстування проекційного модуля .....                                                                                  | 16 |
| 1.5 Виміри і відомі параметри проекційного модуля .....                                                                  | 19 |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....                                                                                       | 23 |
| 2.1 Методики вимірювання фокусних довжин лінз.....                                                                       | 23 |
| 2.1.1 Метод вимірювання лінійного збільшення на оптичній лаві: .....                                                     | 23 |
| 2.1.2 Гоніометричний метод(метод кутових вимірювань) .....                                                               | 25 |
| 2.2 Способи знаходження головних площин у досліджуваних лінз.....                                                        | 27 |
| 2.3 Спрощення системи до моделі трьох дзеркал. Векторний вивід траєкторії<br>зображення точки .....                      | 29 |
| РОЗДІЛ 3. ОБРОБКА І АНАЛІЗ ДАННИХ.....                                                                                   | 35 |
| 3.1 Розрахунки фокусних відстаней, які досліджувались гоніометричним<br>методом та знаходження головних площин лінз..... | 35 |
| 3.2 Побудова оптичної моделі проекційного модуля .....                                                                   | 37 |
| 3.3 Розрахунок задачі трьох дзеркал із лінзами .....                                                                     | 40 |
| 3.4 Залежність кутів нахилу від застосованих прокладок .....                                                             | 43 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                            | 49 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ .....                                                                                                     | 50 |

## ВСТУП

У сучасних умовах, особливо в контексті військової агресії Російської Федерації проти України, забезпечення військового персоналу необхідним спорядженням та технікою є критично важливим завданням.

Ремонт і налаштування наявної в запасі техніки виявляються значно більш економними і швидкими методами порівняно з придбанням нової техніки. Купівля нової техніки часто супроводжується значними витратами, які включають в себе не лише вартість самого приладу, але й додаткові витрати на постачання, установку, навчання персоналу та інші асоційовані витрати. Ремонт та налаштування наявної в запасі техніки дозволяють максимально використовувати ресурси та потенціал вже існуючої техніки, забезпечуючи її продовження терміну служби та функціональність за менші кошти та менший час.

До складу такої техніки входять й оптичні системи приладів прицілювання, які мають вирішальне значення для точності та ефективності бойових дій. У цьому контексті, розробка методики юстування проекційного модуля деякої конкретної оптичної системи приладу прицілювання є надзвичайно актуальною задачею.

До цього часу не існувало жодних методичних рекомендацій щодо юстування проекційного модуля цієї оптичної системи, тому фахівці вимушені були робити юстування на око, спираючись на власний досвід. Однак, такий підхід має свої обмеження. Він є неефективним та надто часо- та ресурсозатратним, а також суттєво залежить від особистого досвіду та кваліфікації кожного окремого фахівця. Це обмежує можливість залучення широкого кола працівників до цієї роботи та унеможливорює ефективне використання наявних ресурсів. Тому, необхідно розробити методику юстування для досліджуваного проекційного модуля приладу прицілювання, яка би дозволяла прискорити та спростити процес.

Метою цієї дипломної роботи є розробка методики для юстування проекційного модуля приладу прицілювання, яка враховуватиме специфіку його

роботи та дозволить виконувати юстувальні роботи швидше та більш точно. Впровадження цієї методики має на меті покращити ефективність та продуктивність процесу юстування, а також забезпечити можливість залучення до цієї роботи персоналу з різним рівнем кваліфікації, під контролем досвідчених спеціалістів, навіть тих, хто не має значного досвіду в даній галузі.

Основною перевагою розробленої методики є значне зменшення часу, необхідного для юстування проекційного модуля приладу прицілювання, що сприятиме швидкому відновленню його працездатності.

Отже, дана дипломна робота має велике значення для військової сфери, оскільки розробка ефективної та швидкої методики юстування проекційного модуля приладу прицілювання дозволить забезпечити швидкий та економний ремонт наявної в запасі техніки, а також залучити до цього процесу більше працівників.

## **РОЗДІЛ 1. БУДОВА ДОСЛІДЖУВАНОГО ПРИЛАДУ ПРИЦІЛЮВАННЯ, ОСНОВНІ МОДУЛІ ТА ЗАДАЧІ ЮСТУВАННЯ**

### **1.1 Прилад прицілювання і його проекційний модуль**

Концепція досліджуваного приладу прицілювання передбачає наявність двох режимів роботи: "денного" та "нічного". Один із яких вимагає наявності специфічних компонентів для забезпечення ефективної роботи. Одним з ключових елементів цього приладу є досліджуваний проекційний модуль, який виконує важливу функцію[1].

Проекційний модуль оптичної системи - це компонент або складова частина оптичної системи приладу прицілювання, яка відповідає за передачу зображення з вихідного елемента на вхідний елемент. Цей модуль може включати в себе елементи, такі як лінзи, призми, дзеркала, фільтри та інші оптичні компоненти, які забезпечують формування, фокусування та відображення зображення з відповідною якістю та масштабом[2]. В нашому випадку необхідно передати зображення отримане після електронно-оптичного перетворювача(ЕОП) до фокальної площини окуляра.

Принцип роботи приладу прицілювання полягає в наступному: зображення потрапляє до приладу через вхідний вікно, де воно зустрічає роздільне дзеркало. Роздільне дзеркало розбиває світло, що потрапляє, на два канали - "денний" та "нічний". Кожен з цих каналів має свої унікальні особливості та виконує певні завдання[1].

На "денному" каналі до окуляра потрапляє лише невелика частка світла, що становить до 20% від загальної інтенсивності. Після роздільного дзеркала на зображення накладається сітка від коліматора, після чого зображення направляється до окуляра для спостереження. З іншого боку, "нічний" канал приймає більшу кількість світла, що дозволяє покращити роботу ЕОП.

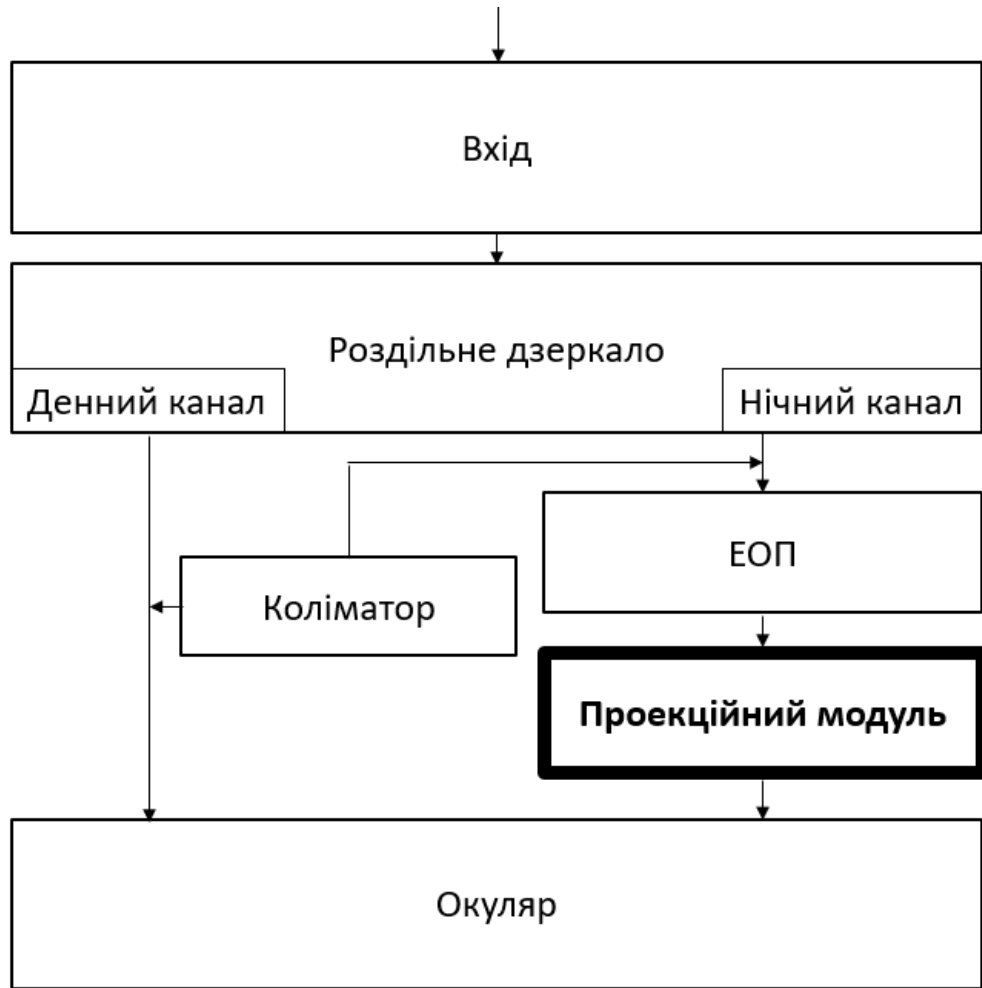
У "нічному" каналі після роздільного дзеркала та накладання сітки від коліматора зображення спрямовується до ЕОП. В цьому каналі інфрачервоне світло перетворюється на електрони, які підсилюються та відображаються на люмінесцентному екрані[3]. Враховуючи розміри ЕОП зображення, з нього отримується на деякій відстані в іншій частині приладу відносно місця розділення каналів, а отже необхідно правильно направити зображення з екрану ЕОП до окуляра. Саме цю функцію і виконує проекційний модуль.

Наочне схематичне зображення компонентів приладу прицілювання можна побачити на рисунку 1.1.1, який детально ілюструє їх взаємозв'язок та розташування.

## **1.2 Модуль ЕОП**

Електронно-оптичний перетворювач (ЕОП) – це вакуумний фотоелектронний прилад для перетворення невидимого оком зображення (в ближньому інфрачервоному, ультрафіолетовому або рентгенівському спектрі) у видиме або для посилення яскравості видимого зображення, що дозволяє використовувати її в умовах низької освітленості, наприклад, вночі.

Принцип роботи полягає в перетворенні фотонів із невидимого спектру у електрони, і в подальшому їх перетворенні у фотони видимого спектру. В ЕОП другого і пізніших поколінь також має місце підсилення електронів за допомогою мікроканальних пластин.

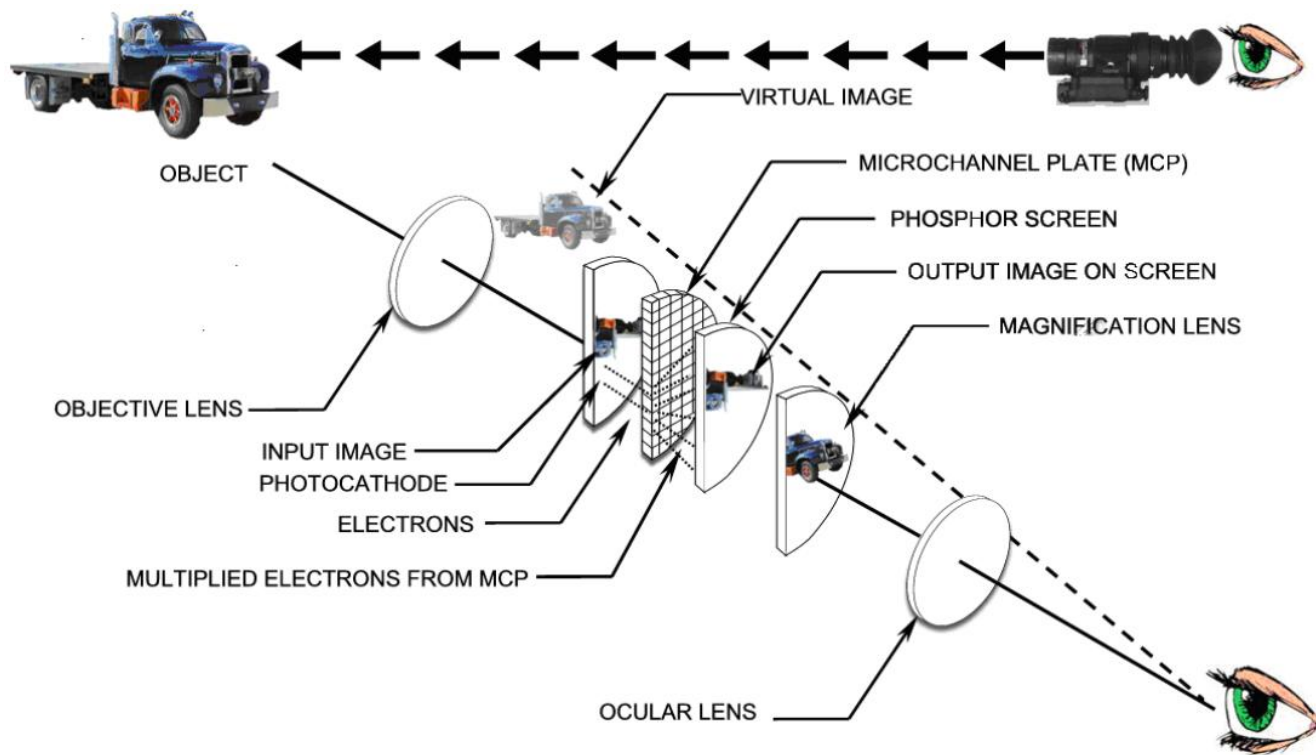


*Рисунок 1.1.1 – Схематичне зображення компонентів приладу прицілювання*

Існують однокамерні та багатокамерні ЕОП (являють собою по чергово з'єднані однокамерні ЕОП) . Різниця між ними в полягає в коефіцієнті підсилення яскравості.

Принцип роботи пояснений на рисунку 1.2.1. Фотони від джерела слабкого світла потрапляють в об'єктив, який фокусує зображення на фотокатоді. Фотокатод вивільняє електрони за допомогою фотоелектричного ефекту, коли вхідні фотони потрапляють на нього. Електрони прискорюються за допомогою високовольтного потенціалу до мікроканальної пластини (МКП). Кожен високоенергетичний електрон, який потрапляє на МКП, вибиває певну кількість вторинних електронів з

МКП в процесі, який називається вторинною каскадною емісією. Окрема (нижча) різниця зарядів прискорює вторинні електрони з МКП, поки вони не потрапляють на люмінофорний екран на іншому кінці підсилювача. Зображення на люмінофорному екрані фокусується лінзою окуляра. Люмінофор зазвичай зеленого кольору, оскільки людське око більш чутливе до зеленого, ніж до інших кольорів, а також тому, що історично первинний матеріал, який використовувався для виробництва люмінофорних екранів, випромінював зелене світло[3].



*Рисунок 1.2.1 Структурна схема для пояснення принципу роботи ЕОП 2 і 3 поколінь[3]*

Використання МКП слугувало проривом в конструюванні ЕОП, саме їх впровадження утворило 2 покоління. В свою чергу ЕОП нульового і першого

поколінь направляли електрони від фотокатоду одразу в люмінофорний екран, що пояснює таку різницю в підсиленні зображення між першим і другим поколіннями.

### **1.3 Процес повернення приладу прицілювання в робочий стан**

Повернення приладу прицілювання в робочий стан є важливим етапом після проведення ремонту, зняття з резерву або перевірки та налаштування запозиченої техніки. Зважаючи на складність та багатокomпонентну структуру приладу прицілювання, цей процес залучає значну кількість фахівців.

Першим кроком у поверненні приладу прицілювання в робочий стан є розбірка на його складові частини. Кожна складова піддається окремій обробці та перевірці. Виконуються стандартні процедури, такі як обробка металевого корпусу, фарбування, перевірка цілісності та прозорості оптичних елементів, їх миття або заміна за необхідності. Також проводиться перевірка роботи електрики та вирішення будь-яких виявлених проблем.

Проте важливо зазначити, що в стані розборки не рекомендується знімати оптичні елементи з їхніх місць, щоб уникнути зміни налаштувань. В протилежному випадку це збільшить час подальшого юстування. Винятком є ситуація, коли без зняття якоїсь складової неможливо отримати доступ до іншого оптичного елементу, або коли місце розташування оптичного елементу, або його кріплення розраховано тільки на прийняття одного конкретного положення.

Після проведення необхідних робіт з обслуговування та перевірки, прилад збирається знову та готується до процесу юстування. Тільки одна складова приладу не потребує того, щоб прилад був зібраний під час її юстування, це коліматор. Його можливо налаштовувати спостерігаючи за його сітками через зорову трубу. В інших випадках юстування відбувається при зібраному приладі так, щоб можливо було спостерігати за результатами своїх дій через окуляр.

Юстування приладу прицілювання вимагає роботи з багатьма вузлами. Основним завданням юстування є зведення і центрування полів зору "денного" і "нічного" каналів, а також усунення паралаксу між ними. Для досягнення цих цілей необхідні правильне розміщення ЕОП в приладі та належне юстування проекційного модуля. На рисунку 1.3.1 можна побачити як виглядають поля зору в а) – неналаштованому стані і б) – після юстування.

ЕОП займає майже всю ширину приладу прицілювання, маючи витягнуту форму. Він кріпиться за допомогою багатьох гвинтів і може нахилитися в різних площинах, а також рухатися вздовж оптичної осі. Ці маніпуляції відповідають за різні параметри юстування. Наприклад, рух вздовж осі ЕОП відповідає за корекцію паралаксу, а рух у різних площинах кінця ЕОП впливає на положення сітки коліматора в полі зору "нічного" каналу. Крім того, рух кінця ЕОП з боку люмінесцентного екрану впливає на переміщення поля зору "нічного" каналу разом з його сіткою.

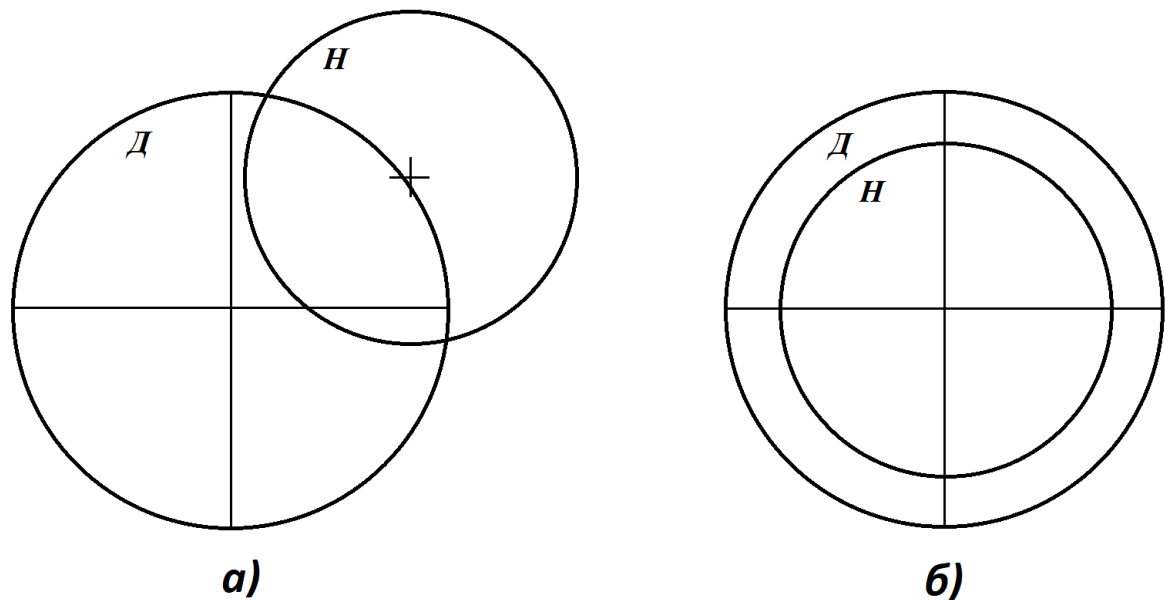


Рисунок 1.3.1 – Вигляд «денного» і «нічного» полів зору через окуляр в а) розгалуженому, б)зведеному станах

Теоретично можна здійснити юстування, розташовуючи ЕОП правильно і не торкаючись проекційного модуля. Однак, розташування ЕОП і його кріплення ускладнюють точне налаштування, а часто й роблять його неможливим. Тому при юстуванні особлива увага приділяється усуненню паралаксу і центруванню нічної сітки у її полі зору. Поля зору зводять максимально можливо, щоб не втратити попередні калібрування, а додаткову точність досягають завдяки юстуванню проекційного модуля.

#### 1.4 Юстування проекційного модуля

Оптична схема проекційного модуля, що використовується у досліджуваному приладі прицілювання, показана на рисунку 1.4.1. Вона включає три відбиваючі рівнобедрені призми АР-90[4] і дві лінзи, параметри яких потребують визначення.

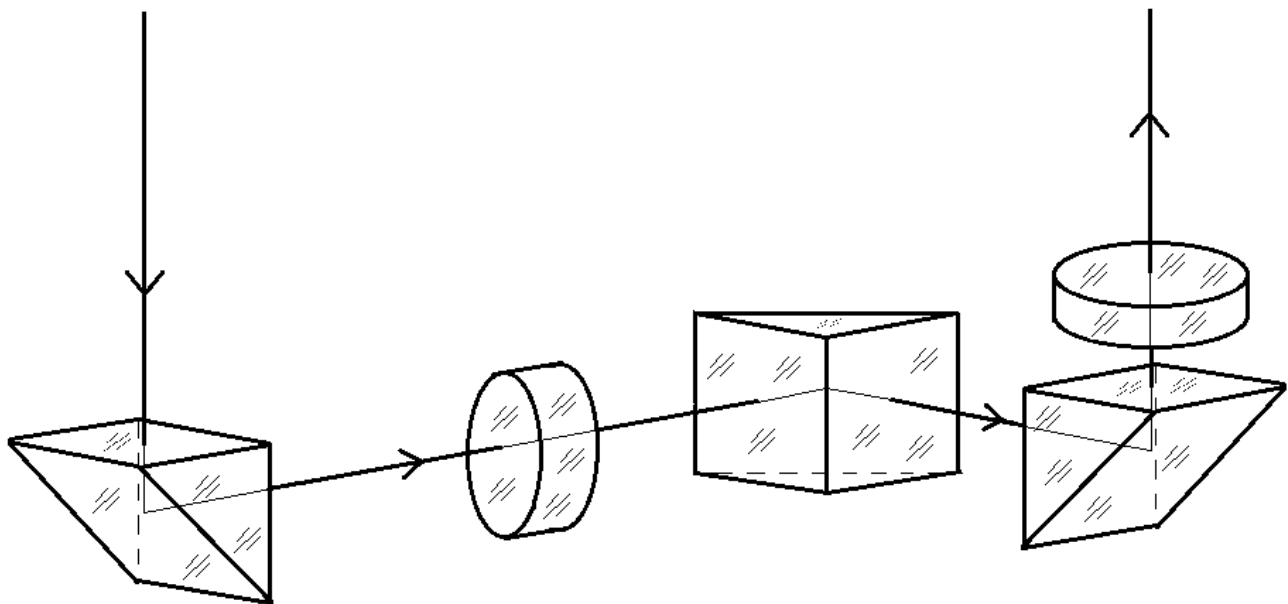


Рисунок 1.4.1 – Оптична схема проекційного модуля приладу прицілювання

Процес юстування проекційного модуля включає в себе налаштування параметрів призми і лінз таким чином, щоб зображення, що проходить через них, було правильно спрямоване в фокальну площину окуляра. Це досягається шляхом регулювання положення і нахилу елементів проекційного модуля.

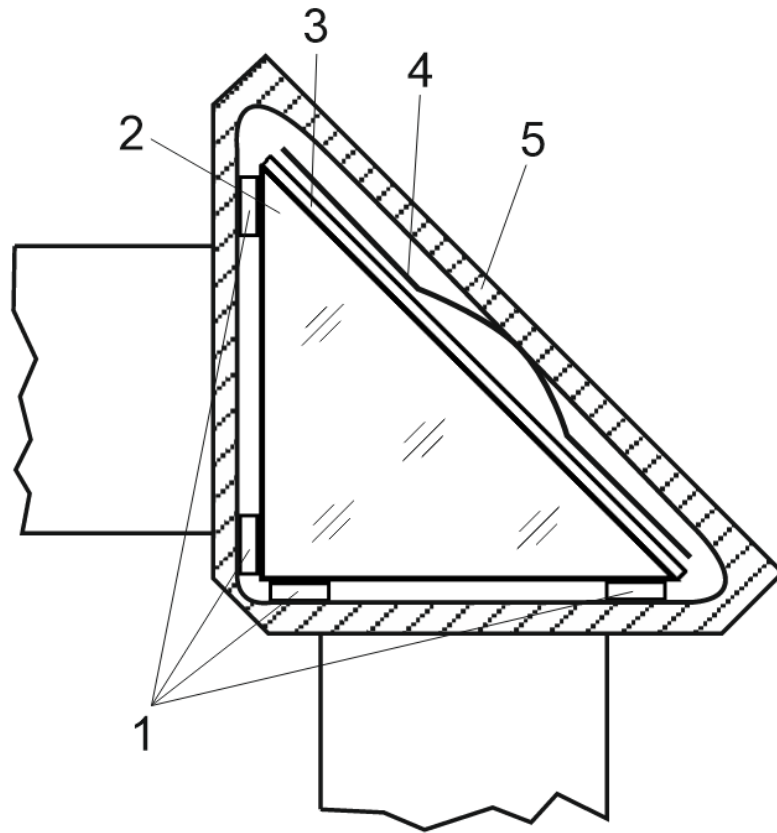
Лінзи в проекційному модулі вкручені на різьбу до крайнього положення і для досягнення цілі – зведення полів зору, не потребують додаткового налаштування. Особливу увагу приділяють нахилу призми, які відповідають за правильну проекцію зображення.

Однак не існує зовнішніх систем для юстування, тому для внесення змін потрібно безпосередньо розібрати відповідну частину модуля і змінити необхідний параметр.

У проекційному модулі призми розташовані згідно з ілюстрацією на рисунку 1.4.2, де числами позначені відображені елементи. Зокрема, призма 2 утримується на прокладках 1, до яких притискається за допомогою пружини 4. Ця пружина в свою чергу притискає захисну пластинку 3 разом з призмою.

Нахил призми в проекційному модулі можна регулювати шляхом змінення товщини прокладок. Під час налаштування рекомендується змінювати прокладки, які розташовані ближче до головної вершини призми. При малих кутах цей підхід забезпечує ефект, еквівалентний оберту призми навколо осі, що лежить на її відбиваючій грані і є перпендикулярною до головного перерізу призми.

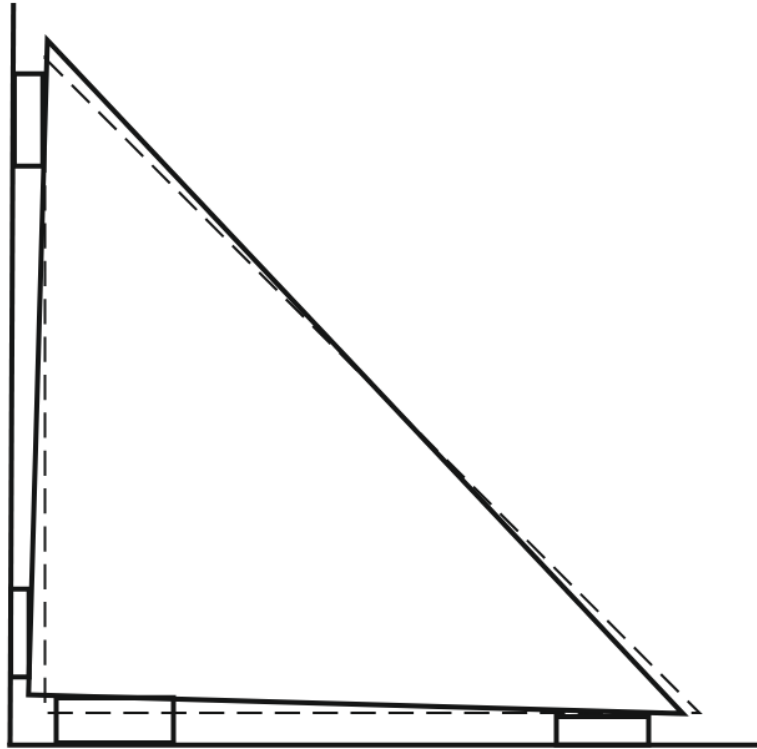
При виконанні налаштування проекційного модуля також рекомендується звернути увагу на другу і третю призми, якщо розглядати їх в порядку проходження зображення. Маніпулюючи цими призмами, можна досягти бажаного нахилу і оптимального положення зображення в фокальній площині окуляра. Ці призми мають великий вплив на кут нахилу та кінцеву проекцію зображення, тому їх налаштування є важливим етапом процесу юстування.



1 - прокладки, 2 - призма, 3 - захисна пластина, 4 - пружина, 5 – зовнішній металевий каркас

*Рисунок 1.4.2 – Розташування призми в проекційному модулі*

Під час налаштування нахилу призми важливо враховувати зміну товщини прокладок з обох боків призми. Збільшуючи товщину з одного боку, слід відповідно зменшувати товщину з іншого боку, щоб забезпечити балансування нахилу призми. Це дозволяє досягти точної регуляції та уникнути небажаних спотворень зображення. Оберт призми таким шляхом зображено на рисунку 1.4.3(пунктиром позначено початкове положення лінзи).



*Рисунок 1.4.3 – Оберт лінзи шляхом зміни товщини прокладок*

### **1.5 Виміри і відомі параметри проекційного модуля**

Досліджуваний проекційний модуль не має повної документації та методичних рекомендацій щодо його юстування, що вказує на необхідність проведення власних досліджень та аналізу його характеристик. Однак, із наявних даних відомо, що скло, використане в призмах і лінзах проекційного модуля, має маркування K8 та показник заломлення 1,5163[5].

Для отримання початкових параметрів проекційного модуля були проведені виміри геометричних розмірів складових шляху між екраном ЕОП та початком проекційного модуля(там на шляху присутня ще одна поворотна призма в фіксованому положенні, за розміром ідентична першій призмі модуля і розташована

дзеркально до неї відносно площини, що перпендикулярна оптичній осі між ними), а також самого модуля. Отримані дані представлені у таблиці 1.4.1:

*Таблиця 1.4.1 Початкові параметри проекційного модуля*

| <i>Параметр</i>                                                                                    | <i>Данні</i> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Діаметр екрану на виході з ЕОП                                                                     | 18 мм.       |
| Відстань від екрану ЕОП до поворотної призми за межами проекційного модуля(зовнішньої)             | 7 мм.        |
| Відстань між вихідною поверхнею зовнішньої призми і вхідною першої призми проекційного модуля      | 40,5 мм.     |
| Відстань між вихідною поверхнею першої призми проекційного модуля і вхідною поверхнею першої лінзи | 85 мм.       |
| Відстань між вихідною поверхнею першої лінзи і вхідною поверхнею другої призми                     | 42 мм.       |
| Відстань між вихідною поверхнею другої призми і вхідною третьої призми                             | 37 мм.       |
| Відстань між вихідною поверхнею третьої призми і вхідною поверхнею другої лінзи                    | 5 мм.        |

|                                                                                |        |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Довжина катетів основи в зовнішній призмі та першій призмі проекційного модуля | 30 мм. |
| Довжина катетів основи в другій та третій призмах проекційного модуля          | 34 мм. |
| Товщина першої лінзи                                                           | 13 мм. |
| Товщина другої лінзи                                                           | 12 мм. |
| Коефіцієнт заломлення матеріалу усіх оптичних елементів системи                | 1,5163 |

Використовуючи наведенні початкові данні, необхідно дослідити оптичну систему проекційного модуля приладу прицілювання та розробити методичні вказівки для його юстування.

Отже, найважливішими в юстуванні приладу прицілювання є ЕОП і проекційний модуль. У зв'язку із розмірами ЕОП і його великим ступенем свободи у сенсі рухливості при юстуванні, його переміщення в першу чергу робиться для центрування сітки коліматора в «нічному» полі зору, а також для забезпечення відсутності паралаксу між полями зору «денного» і «нічного» каналу. Завдяки ЕОП можна також і звести обидва канали, але виконати одразу усі три речі дуже складно, так як кожний рух ЕОП тим чи іншим чином впливає на усі три параметри. Тому зведення полів зору можна виконати не повністю, а потім компенсувати це юстуванням проекційного модуля.

Було розглянуто причину доцільності розробки методичних вказівок саме для проекційного модуля:

- при юстуванні ЕОП неможливо точно відмічати його положення і кути нахилу відносно інших систем приладу прицілювання. Тому робити точні рекомендації з його юстування немає сенсу, бо ми не зможемо їх якісно

використати і в будь-якому випадку юстуванням цього модуля буде займатися досвідчений фахівець.

- хоча проекційний модуль і відповідає за більш точні налаштування зведення полів зору двох каналів, при його юстуванні ми змінюємо кути нахилу призми використовуючи прокладки конкретних товщин і їх комбінації(1-100 мкм).

Тому для проекційного модуля доречніше розробити методичні вказівки щодо впливу товщини використаних прокладок на відхилення зображення на виході проекційного модуля.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Методики вимірювання фокусних довжин лінз

В досліджуваному проєкційному модулі присутні одразу дві лінзи із невідомими параметрами. Для дослідження системи є необхідним знати фокусні відстані лінз, тому ми підбираємо метод за яким це буде зручно і ефективно визначити.

Найбільш відомими методами виміру фокусної відстані є:

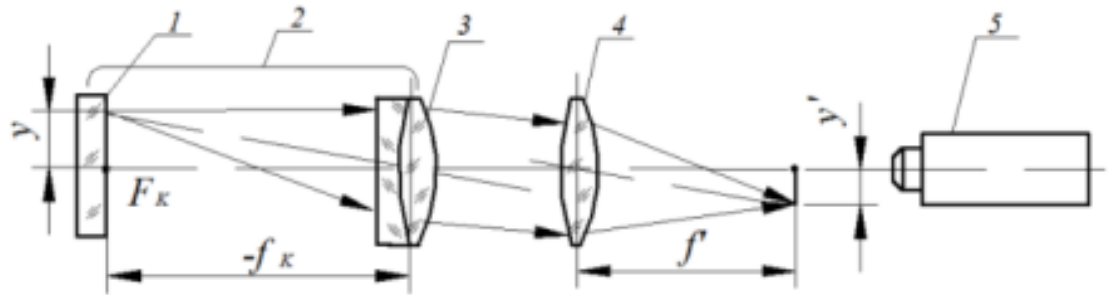
- метод вимірювання лінійного збільшення на оптичній лаві – горизонтальній або вертикальній, а також на установках коліматорного типу – фокометрах;
- метод кутових вимірювань, що здійснюється на спеціальних приладах, які забезпечені точним кутомірним пристроєм (гоніометром або теодолітом) та оптичною системою коліматорного типу (коліматор і проста або автоколімаційна зорова труба);
- коінцидентний метод, який здійснюється на спеціальному приладі, який називається коінциденц-фокометр[6].

#### 2.1.1 Метод вимірювання лінійного збільшення на оптичній лаві:

Суть методу збільшення полягає у вимірюванні величини зображення тест-об'єкта  $y$  отриманого у фокальній площині контрольованого об'єктива та подальшому розрахунку фокусної відстані досліджуваної оптичної системи  $f$  з урахуванням розміру тест-об'єкта  $y$  та величини фокусної відстані об'єктива коліматора  $f_k$  вимірювальної установки за формулою(2.1.1)[6]:

$$f' = f_k \cdot \frac{y'}{y} \quad (2.1.1)$$

Схема приладу вимірювання розміру зображення, візуальним методом на оптичній лаві, представлена на рисунку 2.1.1:



1 – міра; 2 – коліматор; 3 – об'єктив коліматора; 4 – контрольований об'єктив;  
5 – мікроскоп з гвинтовим окулярним мікрометром.

*Рисунок 2.1.1 – Схема приладу для виміру фокусних відстаней методом лінійного збільшення[7]*

Методика вимірювання фокусної відстані об'єктива зводиться до наступного. Перед початком вимірювань необхідно встановити тест-об'єкт у вигляді штрихової міри точно в фокусі довгофокусного об'єктива коліматора. Після чого контрольований об'єктив встановлюють між коліматором та вимірювальним мікроскопом і юстують його на оптичній лаві.

Зображення предмета  $y'$ , що дається об'єктивом, що перевіряється у його фокальній площині, вимірюють шляхом наведення мікроскопа на горизонтальні штрихи міри (база міри), переміщаючи мікроскоп перпендикулярно до оптичної осі. Відлік знімають по гвинтовому окуляр-мікрометру. Фокусну відстань обчислюють за формулою(2.1.1). Точність методу вимірювання залежить від декількох факторів,

як-то похибка вимірювання розміру зображення, пов'язана з інструментальною похибкою окуляр-мікрометра, похибка виготовлення шкали, похибка поздовжнього наведення мікроскопа на зображення, похибка поперечного наведення перехрестя окуляр-мікрометра на зображення штрихів шкали, а також кваліфікація оператора та інші фактори. Відносна похибка при визначенні величини фокусної відстані оцінюється на рівні 0,3%-0,6%. [7].

### 2.1.2 Гоніометричний метод(метод кутових вимірювань)

Визначення фокусних відстаней цим методом відрізняється високою точністю, проте процес виміру потребує значного часу. Метод придатний лише для вимірювання фокусних відстаней позитивних систем. Принцип вимірювань полягає у визначенні кутового розміру відрізка шкали, розташованої у фокальній площині контрольованої системи. Знаючи лінійний розмір відрізка шкали  $y$  та визначивши кут  $\omega$ , під яким видно цей відрізок з головної точки об'єктива, можна знайти фокусну відстань за формулою(2.1.2)

$$f = \frac{y}{\tan \omega} \quad (2.1.2)$$

Існують два типи установок для вимірювання фокусних відстаней цим методом. Схема першої установки показана на рисунку 2.1.2 а)

Кутовий обсяг відрізка  $y$ , тобто. кут  $\omega$ , визначається за допомогою обертової зорової труби 3 при нерухомому положенні випробуваного об'єктива 2 і шкали 1, причому зорова труба повинна обертатися навколо осі, що проходить через зіницю входу контрольованої системи.

Схема другої установки показано на рисунок 2.1.2 б). Тут контрольована система, жорстко пов'язана зі шкалою, розташована на столі, що обертається, а

зорова труба нерухома. Кутовий розмір  $\omega$  визначають за допомогою столу, що обертається, по різниці відліків при наведенні перехрестя зорової труби на різні краї відрізка  $y$ . Як і в першому випадку, вісь обертання столу повинна проходити через зіницю входу об'єктива, що контролюється. В обох випадках вимірювання виконують для кількох відрізків  $y$ , і за окремими значеннями  $f'$  визначають середню фокусну відстань.[8]

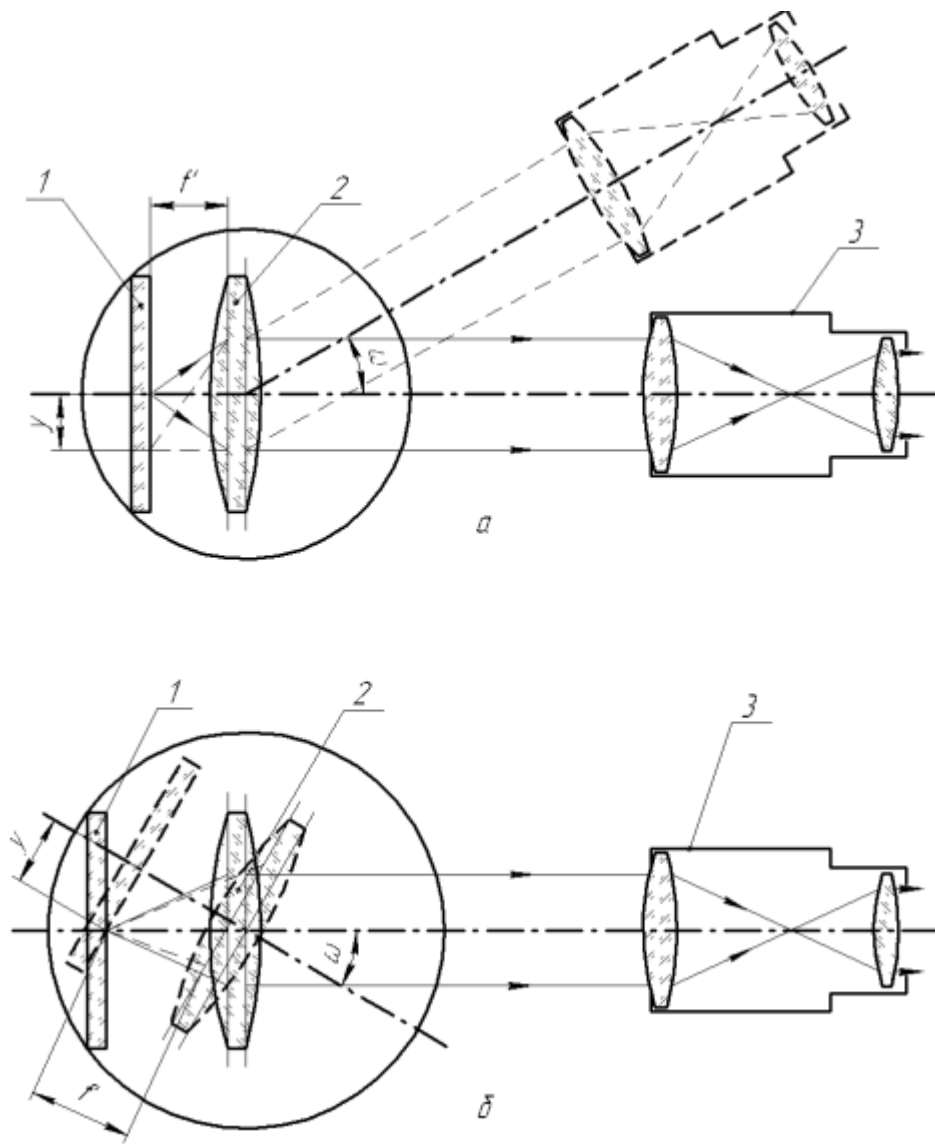


Рисунок 2.1.2 – Схема для вимірювання фокусних відстаней гоніометричним методом із а) - рухомою зоровою трубою, б) – рухомим столиком[7]

Крім помилок, пов'язаних з вимірюванням величини  $u$  і кута  $\omega$ , в похибку визначення фокусної відстані увійде помилка установки шкали у фокальній площині контрольованої системи. Установку шкали здійснюють за допомогою зорової труби, що служить для вимірювання кутів. Зорову трубу заздалегідь встановлюють на "нескінченність". Практична точність методу становить 0,15...0,20%[6,7].

Варто зазначити, що існує багато інших методів, які не були згадані в даному контексті. Деякі з них вимагають спеціального обладнання, а деякі не досягають високої точності. Після розгляду гоніометричного методу, було вирішено зупинитися на ньому, бо гоніометр є в наявності і метод обіцяє високу точність.

## 2.2 Способи знаходження головних площин у досліджуваних лінз

Для побудови точної моделі товстих лінз необхідно знати положення їх головних площин, оскільки вони не співпадають. Просто знаходити фокусну відстань недостатньо. Для обчислення положення головних площин лінзи використовується формули, які базуються на відстані від поверхонь лінзи до відповідних головних площин.

Формулами відстань від поверхонь лінз до відповідних головних площин рахується формулами(2.2.1 і 2.2.2)[9]:

$$S_{H'} = -f' \frac{n-1}{n} \frac{d}{R_1} \quad (2.2.1)$$

$$S_H = f \frac{n-1}{n} \frac{d}{R_2} \quad (2.2.2)$$

В формулах використовуються параметри, які позначені на рисунку 2.2.1.

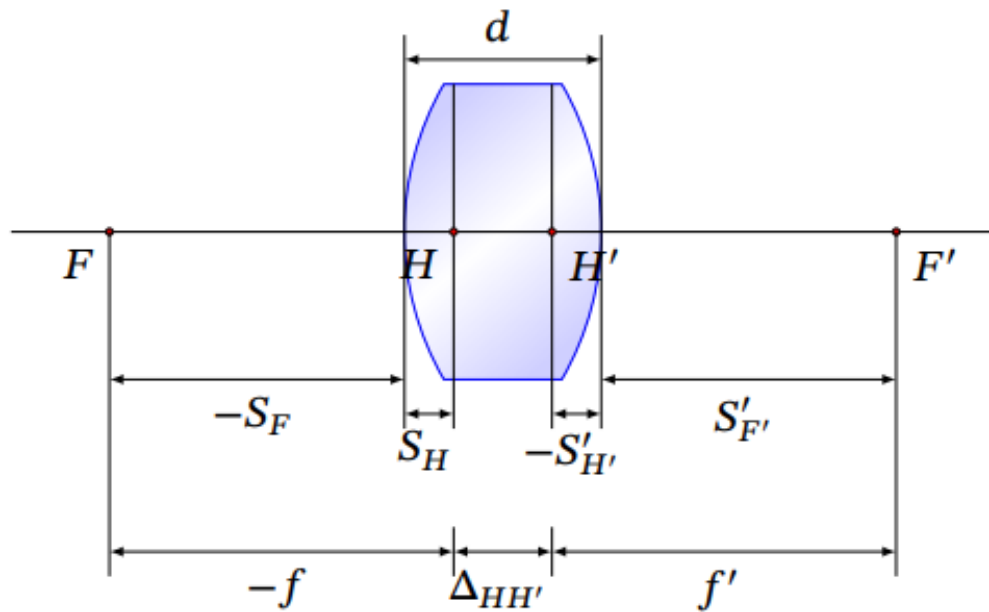


Рисунок 2.2.1 – Параметри збиральної лінзи[10]

Користуючись формулами(2.2.1 і 2.2.2) варто розуміти, що радіуси кривизни лінз також є необхідними для обчислення. В нас немає в наявності інструменту для вимірювання радіусів кривизни, тож для їх знаходження необхідно шукати експериментальні методи.

Однак, для спрощення цього етапу, можна витягнути більше користі із гоніометричного методу, який був обговорений у попередньому підрозділі. А саме, під час вимірювання фокусних відстаней, штангенциркулем фіксуватимемо відстань від поверхні лінзи до шкали  $S_F$  і  $-S'_{F'}$  (вершинні фокусні відстані). З цих вимірювань можна отримати положення головних площин за допомогою наступних простих рівностей:

$$S_{H'} = S_{F'} - f' \quad (2.2.3)$$

$$S_H = S_F - f \quad (2.2.4)$$

### 2.3 Спрощення системи до моделі трьох дзеркал. Векторний вивід траєкторії зображення точки

Для початку розробки методики, ми повинні детально описати траєкторію руху променів у системі проєкційного модуля. На даному етапі, коли параметри лінз ще невідомі, ми розглянемо систему, яка складається з трьох призм, причому лише дві з них можуть обертатися на невеликі кути. Конкретно друга і третя призма візьмуть участь у процесі юстування. Для зручності, ми приведемо ці призми до плоских дзеркал, таким чином, щоб вісь їх обертання знаходилась на площині відбивання та була перпендикулярна головному перерізу кожної призми.

Ми обмежимося розрахунками для променів, які сходяться. Навіть якщо ми не враховуємо лінзи через відсутність їх характеристик, ми все ж припускаємо, що деякий механізм змушує промені сходитися та утворювати зображення на уявному екрані, яке ми сприймаємо як фокальну площину окуляра. Вигляд уявленої нами задачі можна бачити на рисунку 2.3.1.

Для зручності розрахунків, ми створимо координатні системи в центрі осі обертів кожного дзеркала. Почнемо з першого дзеркала і поступово переноситимемо прив'язку від одного дзеркала до наступного. Такий підхід дозволить нам ефективно вирішувати задачу і забезпечить зручну систему координат для подальших обчислень.

Для наших цілей підходить формула(2.3.1)[11]:

$$\rho' = M'r \quad (2.3.1)$$

,де  $M$  - матриця дії плоского дзеркала, яка визначається формулою(2.3.2)[12], яка в свою чергу витікає із формули(2.3.3) – відбитого плоским дзеркалом орта[11,13],  $r$  – радіус-вектор точки предмета відносно початка системи координат, пов'язаного із віссю обертання дзеркала.

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{pmatrix} \quad (2.3.2)$$

,де  $N_x, N_y, N_z$  – проекції орта  $N$  напрямку нормалі дзеркала.

$$A' = A - 2N(AN) = M A \quad (2.3.3)$$

, де  $A$  – падаючий на дзеркало орт, а  $A'$  - відбитий.

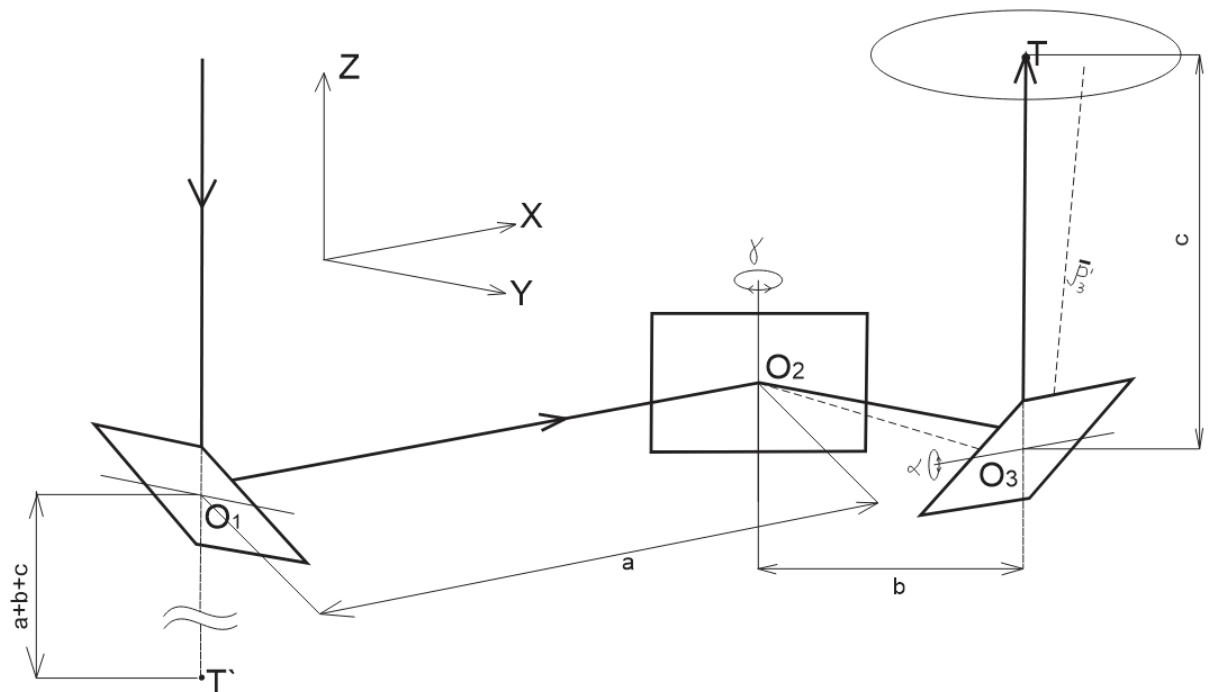


Рисунок 2.3.1 – Задача трьох дзеркал

Для відображення точки від першого дзеркала, з рисунку 2.3.1 видно, що (2.3.4) – радіус-вектор зображення точки Т, що проектується на фокальну площину, але тимчасово уявимо там екран.

$$\mathbf{r}_1 = -(a + b + c)\mathbf{k} \quad (2.3.4)$$

Так як перша призма у нас знаходиться в своєму належному стані, її матриця дії виглядає дуже просто і ми можемо порахувати радіус-вектор точки відбитої від першої призми (2.3.5):

$$\rho'_1 = M_1 \mathbf{r}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -(a + b + c) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (a + b + c) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.3.5)$$

Переходимо до системи координат другого дзеркала, шляхом зміщення вздовж осі Х на відстань а (2.3.6):

$$\mathbf{r}_2 = \rho'_1 - a\mathbf{i} = \begin{pmatrix} (b + c) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.3.6)$$

Друге дзеркало може обертатись на невеликий кут  $\gamma$  навколо осі Z, тому його вектор нормалі виглядає так(2.3.7):

$$\mathbf{N}_1 = -\cos \gamma_1 \mathbf{i} - \sin \gamma_1 \mathbf{j} \quad (2.3.7)$$

, де  $\gamma_1$  – кут між ортом нормалі і падаючим на дзеркало пучком променів, а також  $\gamma_1 = 45^\circ + \gamma$ .

Розрахуємо радіус-вектор зображення точки відбите від другої призми. Через нахил призми, цього разу матриця дії буде розписана(2.3.8):

$$\begin{aligned}\rho'_2 = M'_2 r_2 &= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (b+c) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 2N_x^2 \\ -2N_x N_y \\ -2N_x N_y \end{pmatrix} (b+c) = \\ &= \begin{pmatrix} -\cos 2\gamma_1 \\ -\sin 2\gamma_1 \\ 0 \end{pmatrix} (b+c) = \begin{pmatrix} \sin 2\gamma \\ -\cos 2\gamma \\ 0 \end{pmatrix} (b+c) \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

Переходимо до системи координат третього дзеркала шляхом переміщення проти напрямку осі Y на відстань b (2.3.9):

$$r_3 = \rho'_2 + b\mathbf{j} = \begin{pmatrix} \sin 2\gamma \\ -\cos 2\gamma + \frac{b}{b+c} \\ 0 \end{pmatrix} (b+c) \quad (2.3.9)$$

Друге дзеркало може обертатись на невеликий кут  $\alpha$  навколо осі X, тому його вектор нормалі виглядає так(2.3.10):

$$N_2 = \cos \alpha_2 \mathbf{k} + \sin \alpha_2 \mathbf{j} \quad (2.3.10)$$

, де  $\alpha_1$  – кут між ортом нормалі і падаючим на дзеркало пучком променів, а також  $\alpha_1 = 45^\circ + \alpha$ .

Розрахуємо радіус-вектор зображення точки відбите від останньої призми(2.3.11):

$$\rho'_3 = M'_3 r_3 = \begin{pmatrix} (b+c)\sin 2\gamma \\ (b - (b+c)\cos 2\gamma)(1 - 2N_x^2) \\ -2N_z N_y (b - (b+c)\cos 2\gamma) \end{pmatrix} =$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{pmatrix} (b+c)\sin 2\gamma \\ (b-(b+c)\cos 2\gamma)\cos 2\alpha_2 \\ ((b+c)\cos 2\gamma - b)\sin 2\alpha_2 \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} (b+c)\sin 2\gamma \\ ((b+c)\cos 2\gamma - b)\sin 2\alpha \\ ((b+c)\cos 2\gamma - b)\cos 2\alpha \end{pmatrix} \quad (2.3.11)
\end{aligned}$$

При ідеальному положенні призм радіус-вектор прямував би вздовж оптичної осі і зображення знаходилося би в вершині екрану, а в нашому випадку отримуємо результат розрахунку(2.3.11). А при малих кутах нахилів призм формула(2.3.11) спрощується до (2.3.12):

$$\rho'_3 \approx \begin{pmatrix} 2(b+c)\gamma \\ 2c\alpha \\ c - 2(b+c)\gamma^2 \end{pmatrix} \quad (2.3.12)$$

Отриманий результат є радіус-вектором зображення точки в системі координат відносно третьої відбиваючої поверхні, яке відхилилось від центру «екрану» (радіус-вектор центра якого  $\rho_3 = ck$ ).

Отже, ми розглянули дві методики експериментального визначення фокусних відстаней: метод вимірювання лінійного збільшення на оптичній лаві та гоніометричний метод (метод кутових вимірювань). Було вирішено використати гоніометричний метод для дослідження наших лінз. По-перше, тому що метод обіцяє високу точність (0,15...0,20%), а по-друге, тому що це метод потребує обладнання до якого наразі є доступ.

Також було вирішення питання пошуку положення головних площин лінз. В процесі дослідження фокусних відстаней методом кутових вимірювань після налаштування зорової труби на нескінченність і розташування лінзи так, щоб в трубі було чітке зображення тест об'єкта будемо фіксувати відстань від поверхні призми

до міри. Таким чином знайдемо вершину фокусну відстань за допомогою якої за формулами (2.2.3) і (2.2.4) знайдемо положення головних площин.

Ми розглянули поставлену задачу спростивши її до задачі трьох дзеркал, виключаючи лінзи, та вирішили її роблячи розрахунки для променів що сходяться. Як результат ми отримали розрахунок радіус-вектору зображення відносно системи координат останньої відбиваючої поверхні. Кут відхилення радіус-вектору від оптичної осі і залежність відхилення зображення на «екрані» по осям від кутів нахилів призм будемо шукати вже після дослідження параметрів лінз, щоб врахувати їх в обрахунках.

## РОЗДІЛ 3. ОБРОБКА І АНАЛІЗ ДАНИХ

### 3.1 Розрахунки фокусних відстаней, які досліджувались гоніометричним методом та знаходження головних площин лінз

Керуючись методом описаним в підрозділі 2.1.2 ми виконали експеримент із двома розмірами міри(10мм і 20мм) для кожного способу розташування лінзи(вхідною поверхнею і вихідною поверхнею до міри). В таблицю 3.1.1 занесено кути під якими видно крайні штрихи міри, та порахована за формулою(2.1.2) фокусна відстань(в таблиці наведена середнє значення із чотирьох вимірів). Треба зазначити, що не дивлячись на можливі похибки які могли бути через, можливо, не дуже чітке виставлення міри і досліджуваних лінз на столику, для кожної лінзи усі чотири виміри показують дуже близькі значення і жоден із результатів не відхиляється від середнього більше ніж на 0,7 мм.

Також ми не забували фіксувати вершинні фокуси від кожної поверхні(наведено в таблицю 3.1.2)

*Таблиця 3.1.1 Експериментальні дані для розрахунку фокусних відстаней досліджуваних лінз*

| Виміри першої(внутрішньої) лінзи                               |                                 |                                 |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                                                | Тест із мірою шириною в<br>10мм | Тест із мірою шириною в<br>20мм |
| Виміри $\omega$ коли міра із<br>боку вхідної поверхні<br>лінзи | 3°13'56"                        | 6°25'48"                        |

|                                                                          |                              |                              |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Виміри $\omega$ коли міра із боку вихідної поверхні лінзи                | 3°13'22''                    | 6°26'54''                    |
| Фокусна відстань мм<br><i>*узято середнє значення з чотирьох вимірів</i> | $\approx 177$ мм             |                              |
| Виміри другої(зовнішньої) лінзи                                          |                              |                              |
|                                                                          | Тест із мірою шириною в 10мм | Тест із мірою шириною в 20мм |
| Виміри $\omega$ коли міра із вхідної поверхні лінзи                      | 3°10'02''                    | 6°19'06''                    |
| Виміри $\omega$ коли міра із вихідної поверхні лінзи                     | 3°09'28''                    | 6°16'58''                    |
| Фокусна відстань                                                         | $\approx 181$ мм             |                              |

Отримавши фокусну відстань, ми можемо розрахувати положення головних площин відносно відповідних поверхонь лінзи(як зазначалося в розділі 2.2).

Керуючись формулами (2.2.3) і (2.2.4) знаходимо шукані положення і вносимо усі відомі нам геометричні параметри досліджуваних лінз в таблицю 3.1.2.

*Таблиця 3.1.2 Параметри досліджуваних лінз*

| Параметр лінзи                                              | Перша лінза<br>(внутрішня) | Друга лінза<br>(зовнішня) |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Товщина лінзи мм.                                           | 13                         | 12                        |
| Вершинна фокусна відстань із вхідної сторони ( $-S_F$ ) мм. | 172                        | 180                       |

|                                                                                                                                                           |     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|
| Вершинна фокусна відстань із вихідної сторони ( $S_F^*$ ) мм.                                                                                             | 180 | 177 |
| Фокусна відстань ( $f$ ) мм.                                                                                                                              | 177 | 181 |
| Положення головної площини відносно поверхні лінзи із вхідного боку ( $S_H$ )                                                                             | 5   | 1   |
| Положення головної площини відносно поверхні лінзи із вхідного боку ( $-S_H^*$ )<br><br><i>*мінус означає, що головна площина знаходиться поза лінзою</i> | -3  | -4  |

Користуючись дослідженими характеристиками лінз нашої системи, будемо пропорційно-дійсні схеми, в яких дотримано відношення між фокусними довжинами і відстань між головними площинами(рисунок 3.1.1).

### 3.2 Побудова оптичної моделі проєкційного модуля

Отримавши цінні результати вимірів фокусних довжин і положень головних площин лінз в нашому досліджуваному проєкційному модулі, які занесені до таблиці 3.2.1, ми маємо можливість приступити до наступного кроку. Враховуючи також вихідні дані, які були виміряні на початковому етапі та представлені в таблиці 1.4.1, ми розробимо схему розгортки оптичної системи нашого проєкційного модуля. Ця схема буде витягнута таким чином, щоб всі оптичні осі моделі були вирівняні в одній лінії.

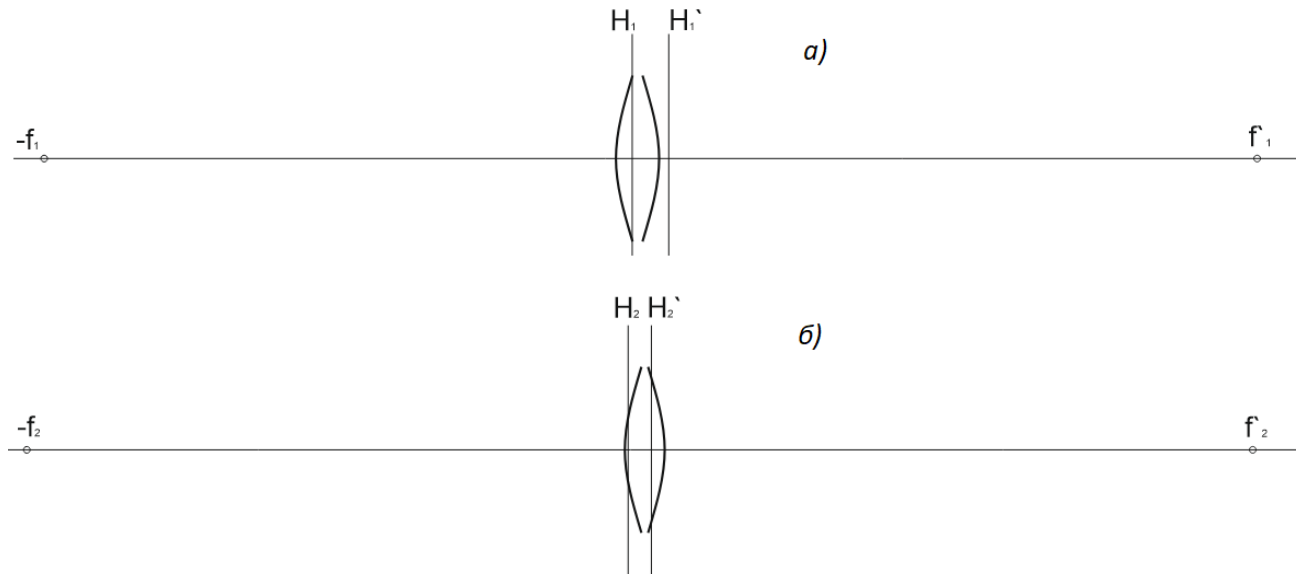


Рисунок 3.1.1 – фокуси і головні площини а) – першої (внутрішньої) і б) – другої (зовнішньої) лінз

Зважаючи на вищевикладену інформацію, ми маємо можливість здійснити вірне розташування всіх оптичних елементів на даній розгортці. Проте, для точного визначення положення фокусів, ми повинні врахувати той факт, що промені проходять частину свого шляху у повітрі, а іншу частину - у кроні (к8). Важливо врахувати співвідношення довжин пройдених шляхів у цих двох середовищах. Таке співвідношення впливає з рівняння (3.2.1):

$$\frac{l_{\text{пов}}}{l_{\text{к8}}} = \frac{n}{n'} \quad (3.2.1)$$

, де  $l_{\text{пов}}$  – це довжина шляху в повітрі, а  $l_{\text{к8}}$  – відповідний шлях але вже в кроні к8.

Після конвертації всіх відстаней з кроні до повітря, ми успішно побудували оптичну модель системи, починаючи з екрану ЕОП і завершуючи фокальною

площиною другої лінзи, а також фокальною площиною окуляра приладу прицілювання. З метою кращого уявлення, на рисунку 3.2.1 наведено границі між середовищами повітря та крони (позначені як  $n$  і  $n'$  відповідно) а також положення відбиваючих поверхонь призми.

Під час дослідження побудованої моделі ми зрозуміли, що передній фокус внутрішньої лінзи точно збігається з положенням екрану ЕОП. Оскільки ми проводили вимірювання на приладі прицілювання, в якому вже було налаштоване положення ЕОП для усунення паралаксу, ми вважаємо це положення фокусу щодо ЕОП правильним.

Положення екрану відносно першої лінзи свідчить про те, що промені між лінзами поширюються паралельно, а після проходження через другу лінзу вони фокусуються в її фокальній площині. Отже, фокальна площина окуляра приладу прицілювання знаходиться в тому ж самому місці.

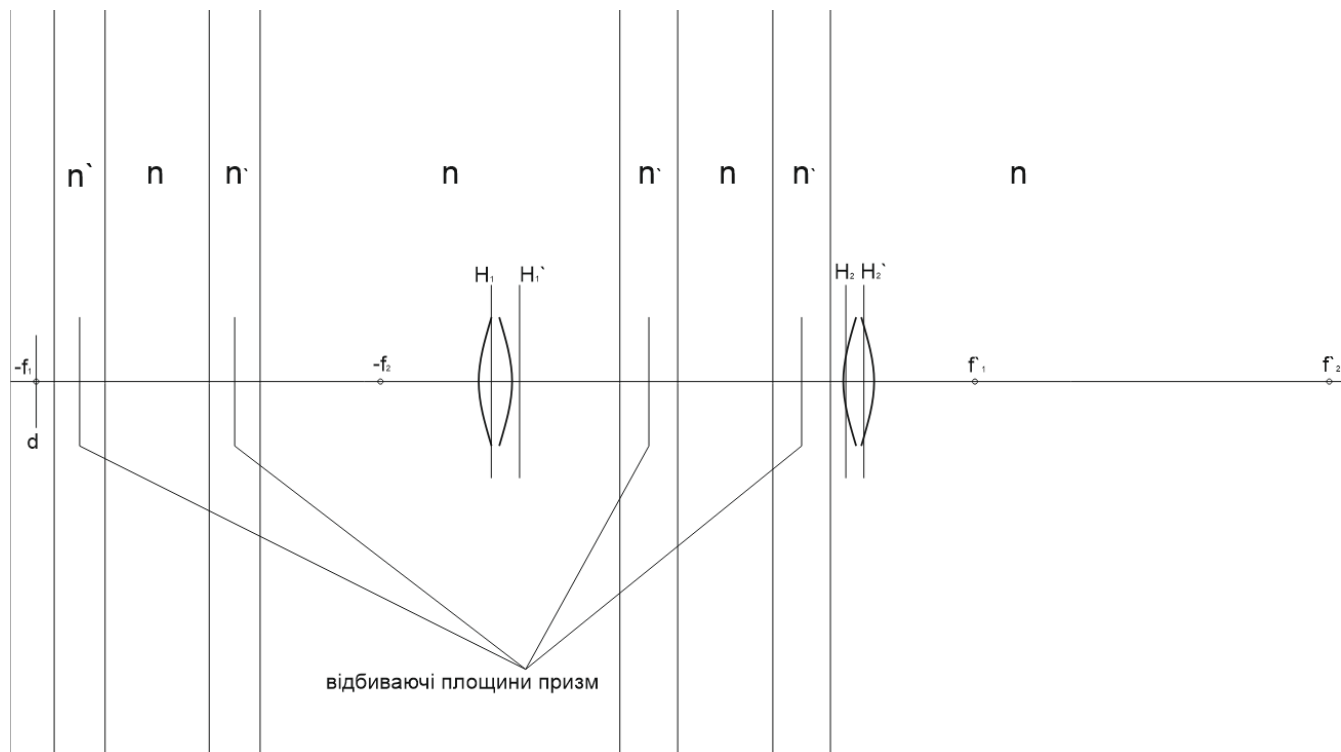


Рисунок 3.2.1 – Розгортка оптичної системи проекційного модуля на одну вісь

### 3.3 Розрахунок задачі трьох дзеркал із лінзами

В розділі 2.3 ми спростили модель нашого проекційного модуля до задачі трьох дзеркал та вирішили її для променів що сходяться. Після створення розгортки оптичної системи модуля ми постановили, що через розміщення екрану ЕОП на фокусі першої(внутрішньої) лінзи, то між лінзами по системі промені будуть прямувати паралельно один одному. Це дає нам можливість більше не виконувати розрахунки для променів, що сходяться і спростити собі задачу.

Тож тепер розглядаємо задачу із чотирьох дзеркал і двох лінз із джерелом зображення в фокусі першої лінзи. Лінзи ми не чіпаємо(*тільки в випадку, якщо з якихось причин, на етапі юстування ЕОП не вдалося загнати вихідний екран ЕОП в фокус першої лінзи. Тоді викручуємо лінзу до тих пір доки екран не потрапить на фокус*), також не маніпулюємо призмою в середині приладу(раніше не брали в розрахунки) і першою призмою із тих самих роздумів, з яких не користувались нею раніше. Тепер, так як до першої лінзи ніякі елементи не рухається, вона дасть після себе пучок паралельних променів, що рухаються паралельно оптичній осі.

Уявимо одиничний вектор  $\mathbf{A}$ , який напрямлений від центра екрану ЕОП вздовж оптичної осі (якщо притримуватись положення осей зазначеного на рисунку 2.3.1, то  $\mathbf{A} = -\mathbf{i}$ ). Тоді, якщо помножити його на матрицю  $M^k$ , яка є матрицею дії системи дзеркал, то отримаємо одиничний вектор на виході із системи( $\mathbf{A}^k$ )(формула(3.3.1)[13]:

$$\mathbf{A}^k = M^k \mathbf{A} = M_k \dots M_2 M_1 \mathbf{A} \quad (3.3.1)[13]$$

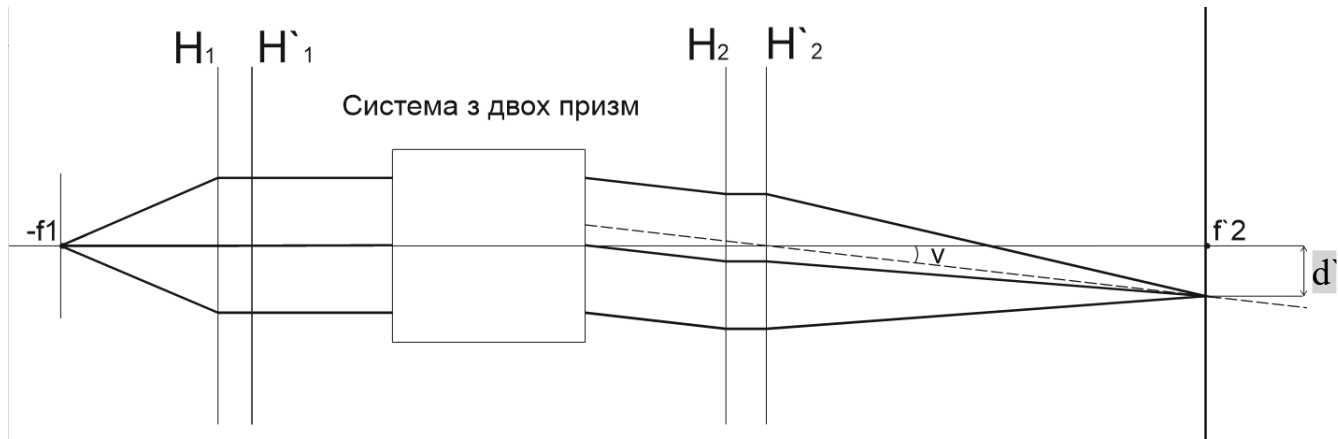
Формуємо дані двох перших матриць спираючись на їх геометричне положення із кутами  $45^\circ$  до осей X і Z, а останні дві спираючись на формули (2.3.2), (2.3.7) і (2.3.10):

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}^{IV} &= M^4 \mathbf{A} = M_4 M_3 M_2 M_1 \mathbf{A} = \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \\ 0 & -\cos 2\alpha & \sin 2\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin 2\gamma & -\cos 2\gamma & 0 \\ -\cos 2\gamma & -\sin 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \\
&\quad * \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{A} =
\end{aligned}$$

*\*перші дві матриці разом дають одиничну матрицю, що змінює знак на протилежний всім елементам першого стовпця, тож можна їх просто вилучити змінивши знак вхідного орта:*

$$\begin{aligned}
&= \begin{pmatrix} \sin 2\gamma & -\cos 2\gamma & 0 \\ \sin 2\alpha \cos 2\gamma & \sin 2\gamma \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \\ \cos 2\alpha \cos 2\gamma & \sin 2\gamma \cos 2\alpha & \sin 2\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} \sin 2\gamma \\ \sin 2\alpha \cos 2\gamma \\ \cos 2\alpha \cos 2\gamma \end{pmatrix} \tag{3.3.2}
\end{aligned}$$

Отримали одиничний орт, який вказує кут під яким падають паралельні промені на останню лінзу. Але так як усі промені паралельні, то промінь, що потрапив на центр лінзи не заломиться, і якщо його продовжити з іншого боку лінзи, то він вказуватиме на точку, що належить фокальній площині другої лінзи, в якій сформується зображення центру екрана ЕОП. Схематично це проілюстровано на рисунку 3.3.1:



$d'$  - загальне відхилення зображення від номінального положення,  $\nu$  – кут між віссю  $z$  і вихідним ортом ( $\cos \nu = \cos 2\alpha \cos 2\gamma$ )

Рисунок 3.3.1 Хід променів в проекційному модулі

Нас не дуже цікавить загальне відхилення, для юстування воно неінформативне. Пошукаємо зсуви зображення окремо по осях. З тривіальної геометрії робимо висновок, що відношення проекції вихідного орта на вісь  $Z$  до фокусної довжини другої лінзи відноситься так само, як проекції на інші осі до відповідних відхилень зображень(3.3.3):

$$\frac{A_z^{IV}}{f} = \frac{A_x^{IV}}{x'} = \frac{A_y^{IV}}{y'} \quad (3.3.3)$$

, де  $x'$  і  $y'$  відхилення від номінального положення в відповідних осях. Тоді залежності цих відхилень від кутів будуть(3.3.4) і (3.3.5):

$$x' = \frac{A_x^{IV} f}{A_z^{IV}} = \frac{f \sin 2\gamma}{\cos 2\alpha \cos 2\gamma} = \frac{f \tan 2\gamma}{\cos 2\alpha} \quad (3.3.4)$$

$$y' = \frac{A_y^{IV} f}{A_z^{IV}} = f \tan 2\alpha \quad (3.3.5)$$

Тримаємо в голові, що тангенс спроститься при малих кутах відхилення призм.

### 3.4 Залежність кутів нахилу від застосованих прокладок

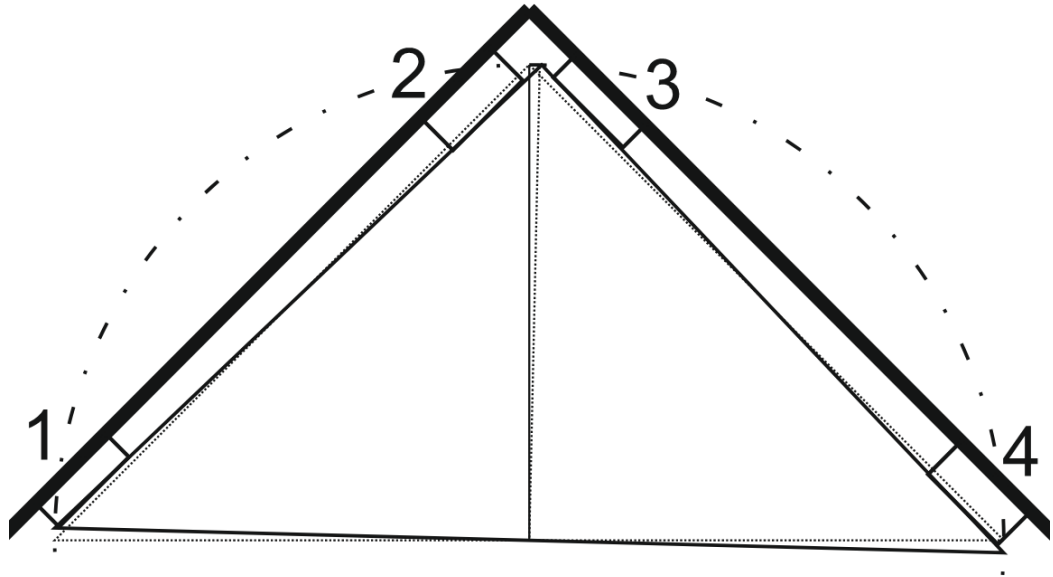
До цього моменту ми не дуже конкретно говорили про прокладки і як саме їх змінювати, щоб тим чи іншим чином впливати на нахили призм. Використовуються прокладки товщинами від 1 до 100 мкм. Вони не великі завширшки – 5мм.

Для наближення реального процесу юстування до моделі, де ми спрощували призми до плоских дзеркал із віссю обертання, яка належить їх відбиваючій поверхні і є перпендикулярною до площини головного перерізу призми, необхідно щоб осі обертання призм розташовувались аналогічним чином. Тому далі буде описано авторські методика для досягнення цієї мети:

- По-перше прокладки мають бути на одній й тій самій відстані від кутів призми, таким чином легше контролювати вплив від зміни їх товщин.
- По друге, якщо уявити собі оберт призми навколо бажаної осі, то стає очевидно, що для цього необхідно змінювати товщини всіх прокладок гранях призми на однакове значення. Керуючись рисунком 3.4.1, можна побачити, що для повороту направо за обговореним методом необхідно однаково зменшити прокладки на місцях 1 і 4, а на місцях 2 і 3 збільшити на ту саму величину.

Спробуємо розрахувати залежність кута нахилу від значення на яке ми змінюємо прокладки. Нахил забезпечує різниця висот прокладок на одній стороні від прямого кута призми. На рисунку 3.4.2 а) маємо ситуацію коли призма знаходиться в номінальному положенні, а на 3.4.2 б) змінили товщини описаним вище способом на якусь величину у. Таким чином утворимо кут нахилу призми

відносно номінального положення  $\beta$ , який є рівним куту відхилення вектору нормалі призми, отже є кутом її повороту.



1-4 – пронумеровані місця під прокладки, товсті лінії – стінки проекційного модуля, тонкий пунктир – номінальне положення лінзи, крапка з комою – траєкторія кутів призми, цільна лінія – призма і прокладки, що її тримають

*Рисунок 3.4.1 – демонстрація зміни товщин прокладок для повороту призми навколо її центра описаного кола(в реальних пропорціях)*

Тепер пов'яжемо кут нахилу і зміни товщин прокладок рівністю(3.4.1):

$$\tan \beta = \frac{a}{l} = \frac{2y}{l} \approx \beta \quad (3.4.1)$$

, де ми спростили тангенс, так як нахили в середині проекційного модуля завжди будуть невеликими.  $l$  - відстань між точками доторку прокладок до призми.

*\*зробимо заміну в змінній, щоб уникнути плутаниці:  $y = h$ .*

Використаємо останнє рівняння(3.4.1) щоб вирази (3.3.4) і (3.3.5) прийняли вигляд(3.4.2) і (3.4.3) відповідно:

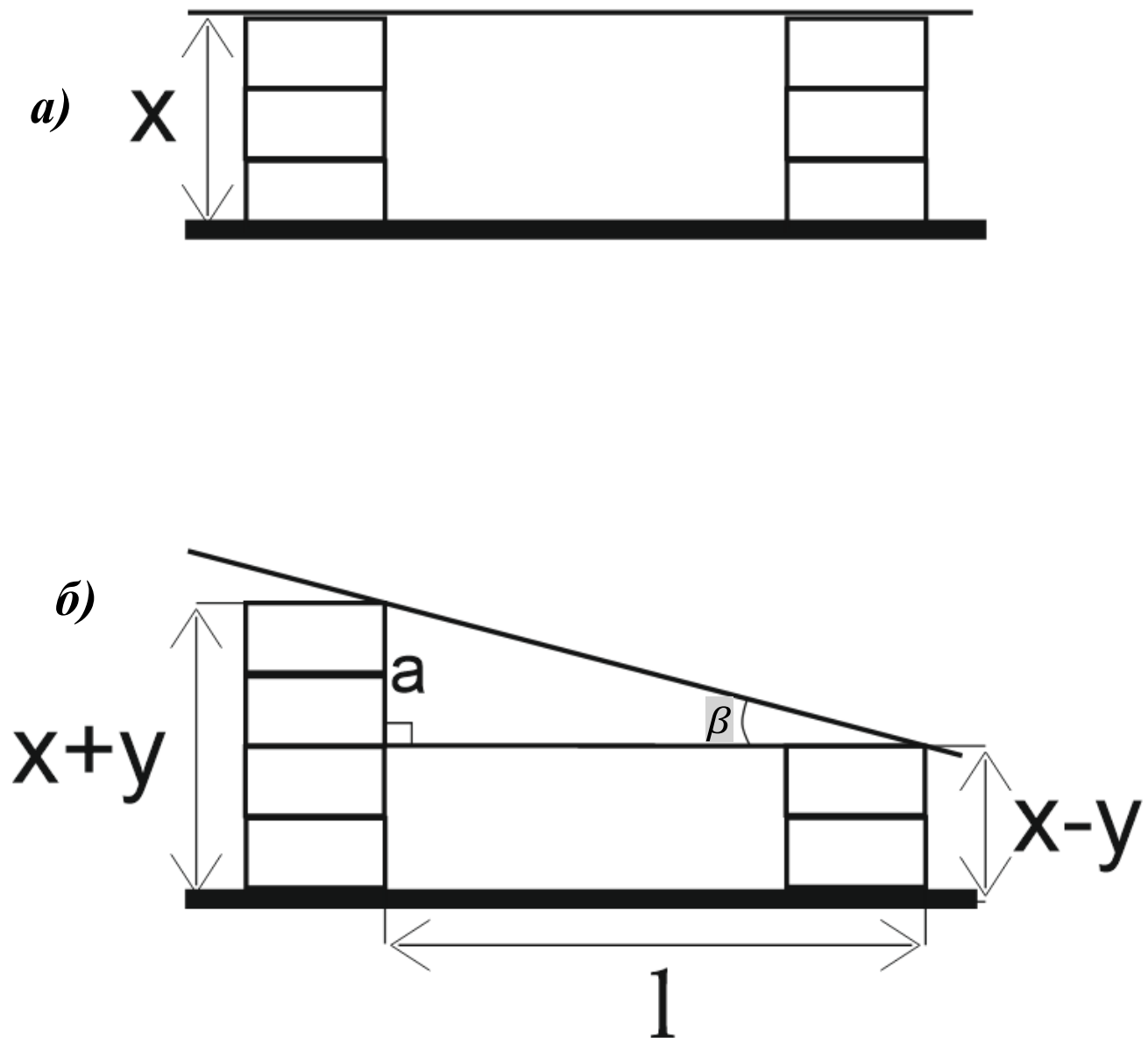
$$x' = \frac{f \tan \frac{4h_\gamma}{l}}{\cos \frac{4h_\alpha}{l}} \approx \frac{f 4h_\gamma}{l \cos \frac{4h_\alpha}{l}} \quad (3.4.2)$$

$$y' = f \tan \frac{4h_\alpha}{l} \approx \frac{4h_\alpha f}{l} \quad (3.4.3)$$

, де  $h_\gamma$  – зміна товщин прокладок в другій призмі, а  $h_\alpha$  – в третій.

Бачимо що оберт останньої призми впливає на зміщення в обох осях, тож методична рекомендація, щодо юстування: спочатку прибирати відхилення  $y'$  рухаючи останню призму, а вже потім другою призмою прибирати відхилення  $x'$ .

Застосуємо отримані залежності для вирішення двох прикладів, щоб перевірити їх корисність.



$x$  – початкова товщина прокладок,  $y$  – величина на яку змінюють товщини прокладок,  $l$  – відстань між точками доторку прокладок до призми,  $\beta$  – кут рівний куту відхилення вектору нормалі призми

Рисунок 3.4.2 – Розрахунки залежності кута нахилу призми від змін товщин прокладок

### Приклад 1:

Нехай усі призми системи знаходяться в номінальному положенні, дослідимо наскільки зміститься зображення вздовж осі Y, якщо зробити зміну товщин прокладок на 0,005 мм. на третій призмі.

По-перше, нам необхідно обговорити, положення прокладок і їх розміри, бо без цього ми не зможемо дізнатись параметр  $l$ . Нехай прокладки розташовані на відстані 1 мм від кожного кута і завширшки 5 мм. Тоді нескладно порахувати, що для обох рухливих призм(з довжиною катетів основи 34 мм. з таблиці 1.4.1)  $l = 27$  мм. Фокусна відстань другої лінзи 181 мм.(таблиця 3.1.1)

Отож:

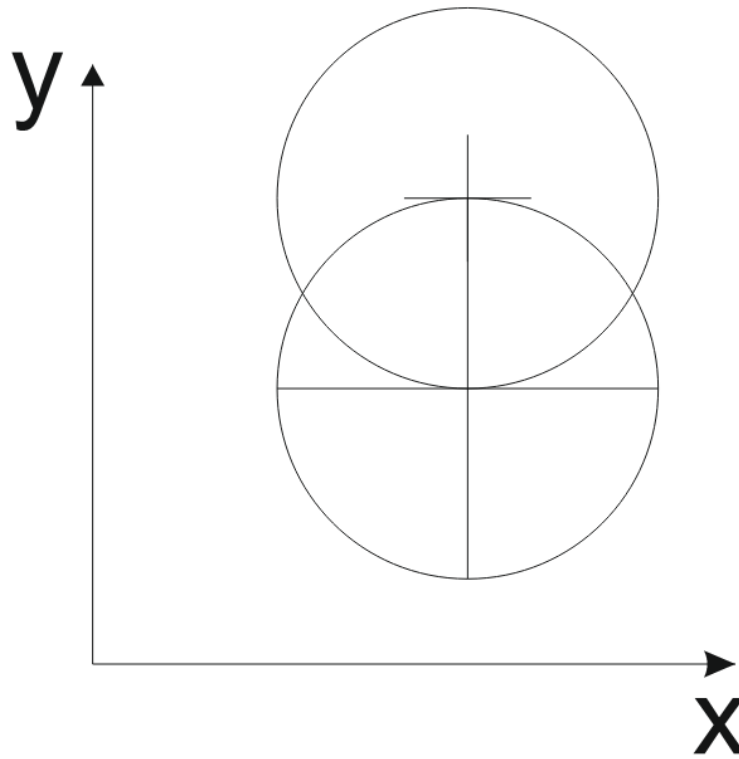
$$y' = \frac{4h_{\alpha}f_2}{l} = \frac{4 \cdot 0,005 \cdot 181}{27} = 0,134 \text{ мм}$$

### Приклад 2

Знайдемо, яку призму і на який кут необхідно повернути і якою зміною товщини прокладок це робити, щоб від'юстувати проекційний модуль із положення продемонстрованого на рисунку 3.4.3:

Для, початку, ми не можемо на око оцінити відстань на яку відхилилось нічне поле зору, але ми можемо зробити це врахувавши пропорції. Поля зору однакового розміру, а збільшення системи ми можемо знайти із рівності:  $\frac{f_1}{f_2} = \frac{d}{d'}$ , де  $d$  – розмір екрану ЕОП(18 мм. із таблиці 1.4.1),  $d'$  - зображення екрану ЕОП в фокальний площині окуляра. З рівності маємо, що  $d' = 18,41$  мм.

Нічний канал зміщений тільки вздовж осі у, тож можна зробити висновок, що другу лінзу не чіпали, оперували тільки третьою і нахиляли її вектор нормалі від осі z, до осі у.



*Рисунок 3.4.3 – Вигляд розгалужених полів зору в окулярі*

Центр зображення знаходиться на відстані радіуса поля зору (9,26 мм.), для такого зміщення виходячи із рівнянь (3.3.5) і (3.4.1) знадобився бы кут:

$$\beta = \frac{2h}{l} = \frac{y'}{2f} \approx 0,026 = 1^{\circ}29'24''$$

Тепер можемо знайти товщину прокладок, щоб повернути третю призму на цей кут:

$$h = \frac{\beta l}{2} = 0,351 \text{ мм.}$$

Отже, щоб повернути зображення нічного каналу до центру необхідно змінити товщини прокладок описаним в цьому розділі методом, так щоб її вектор нормалі повертався в бік осі z.

## ВИСНОВКИ

В даній бакалавр роботі:

1. Проаналізовано роль ключових модулів нічного каналу приладу прицілювання у вирішенні задачі юстування.
2. Експериментально відновлена будова та оптична схема проекційного модуля конкретного приладу прицілювання.
3. На основі аналізу та експериментальної перевірки методів визначення невідомих кардинальних параметрів лінз даної системи, використано найбільш точний - гоніометричний метод яким знайдено фокусні відстані і положення головних площин.
4. Побудовано оптичну розгортку проекційного модуля, для уточнення принципу дії модуля та побудови математично моделі з трьома дзеркалами та двома лінзами.
5. Із застосуванням матрично-векторного представлення ходу променів у системі трьох дзеркал і двох лінз вирішено задачу обрахунку залежності відхилень зображення в фокальній площині окуляра від кутів відхилення призм від їх номінального положення.
6. Описано авторський спосіб зміни товщини прокладок за запропонованим методом, який регулює нахил призм в задачі юстування проекційного модуля, не викликаючи зміщень осі обертання призм.
7. Отримано пряму залежність зміщення зображення у фокальній площині окуляра від зміни товщин прокладок.

Запропонований метод експериментально і теоретично обґрунтований. Він значно пришвидшує і спрощує процес юстування на відміну від інтуїтивного підходу.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Карабан А. О. Методика юстування проекційного модуля оптичної системи. – Стаття на XXI Всеукраїнську науково - практичну конференцію студентів, аспірантів та молодих вчених від ФТІ КПІ: Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики. 2023. м. Київ, Україна. – 451 с.
2. Projection Lens Design[Електронний ресурс] for «Optics For Hire» / Victor Argueta Режим доступу до статті: <https://www.opticsforhire.com/blog/projection-lens-design/>
3. Night Vision Technologies Handbook. / Funded under Interagency Agreement No. HSHQPM-12-X-00031 from the U.S. Department of Homeland Security, Science and Technology Directorate. 2013. – 34 с.
4. Свешникова И. С. Основы геометрической оптики. [для студ. вищ. навч. закл.]. / И. С. Свешникова, Л. А. Запрягаева, И. В. Гузеева, А. С. Филонов. – М.: изд-во «Шико», Москва, 2009. – 216 с. ISBN 5-900758-42-7
5. Марки оптических стекл [текст] / режим доступу до ресурсу: <https://kafvp.kpi.ua/wpcontent/uploads/2017/01/1%D0%9C%D0%B0%D1%80%D0%BA%D0%B8%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BB.pdf>
6. Гвоздева Н. П. Прикладная оптика и оптические измерения. [для студ. вищ. навч. закл. ] / Н. В. Гвоздева, К. И. Коркина. – М., «Машиностроение», 1976. – 387 с.
7. Знаменская М. А. Практика оптической измерительной лаборатории. / Л. М. Кривовяз, Д. Т. Пуряев, М. А. Знаменская. – М., «Машиностроение», 1974. – 332 с.

8. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. I общая часть. 2-е издание, переработанное и дополненное. / Александр Илларионович Тудоровский. – изд-во Академии Наук СССР, Ленинград 1948. – 659 с.
9. Бегунов Б. Н. Теория оптических систем. [для студ. вищ. навч. закл. ]. / Б. Н. Бегунов, Н. П. Заказнов. – М., «Машиностроение», 1973. – 488 с.
10. Іванова В. В. ОПТИКА Практичний курс / В. В. Іванова, С. М. Пономаренко. – МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ., КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2022. – 176 с.
11. Погарев Г. В. Оптические юстировочные задачи. Справочное пособие. / Георгій Васильович Погарев. – Л., «Машиностроение» (Ленинградское отделение), 1974. – 224 с.
12. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. / Георгій Васильович Погарев. – изд-во., «Машиностроение», 1968. – 292 с.
13. A. Gerrard. Introduction to matrix methods in optics. / A. Gerrard, J. M. Burch – переклад від: А. И. Божкова, Д. В. Власова. – [Введение в матричную оптику] – «МИР», Москва 1978. – 341 с.