

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА БЕЗКОНТАКТНОГО
ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ОПТИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи ЛОЕТм-24-1
Іван СНЄГІН
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні
технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна
техніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО
(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 175 Інформаційно-вимірювальні технології _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ «Лазерна і оптоелектронна техніка» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Снегіну Івану Олеговичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інформаційно-вимірювальна система безконтактного оцінювання якості оптичних компонентів

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2025 р. № 1024 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: оптична схема контролю: лазер світлодільний, куб коліматор/об'єктив, досліджувана лінза, відбивне дзеркало (сканування), квадрантний фотоприймач; вхідні дані для обробки: азимутальний і радіальний кути, дзеркала та сигнали, чотири сегментів фотоприймача (U1–U4); програмні засоби: TracePro (трасування променів) та алгоритм розрахунку координат енергетичного центру/сумарного сигналу; моделі дефектів: бульбашки, свилі/шліри, помутніння.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Вступ. 2 Теоретичні основи та методи. 3 Комп'ютерне моделювання. 4 Алгоритми обробки даних та результати імітаційних випробувань. 5 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 11 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про безконтактний контроль якості лінз	02.09.25–20.09.25	Виконано
2	Аналіз дефектів лінз для покращенні якості продукції	25.09.25–05.10.25	Виконано
3	Комп'ютерне моделювання в пакеті TracePro. оптичної схеми пристрою	10.10.25–18.10.25	Виконано
4	Аналіз і обробка отриманих результатів	22.10.25–25.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	30.10.25–11.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	14.11.25–20.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КВР на унікальність	26.11.25–08.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	10.12.25–13.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	15.12.25–17.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО
(підпис) (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 42 с., 23 рис., 2 додатки, 10 джерел.

БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ, ОПТИЧНІ КОМПОНЕНТИ, ЯКІСТЬ ЛІНЗИ, КВАДРАНТНИЙ ФОТОПРИЙМАЧ, СКАНУВАННЯ, ТРАСУВАННЯ ПРОМЕНІВ, TRACERPRO, ДЕФЕКТИ СКЛА, ПОМУТНІННЯ.

Об'єкт дослідження – інформаційно-вимірювальна система безконтактного оцінювання якості оптичних компонентів.

Мета роботи – обґрунтувати принцип безконтактного оцінювання якості лінз за зміщенням енергетичного центру лазерного пучка, розробити оптичну конфігурацію та алгоритм обробки даних.

Предмет дослідження — оптична схема, модель сигналів квадрантного фотоприймача та алгоритми обробки даних для виявлення відхилень, зумовлених дефектами лінз.

Метод дослідження – теоретичний аналіз, комп'ютерне моделювання, алгоритмічне опрацювання даних.

Сформовано оптичну схему пристрою та виконано комп'ютерне моделювання в середовищі TracePro для номінального випадку та для моделей дефектів (бульбашки, свилі/шліри, помутніння). Запропоновано алгоритм визначення координат енергетичного центру пучка за сигналами чотирисегментного фотоприймача та підхід до побудови карти відхилень на поверхні лінзи під час сканування. Наведено програмну реалізацію збору даних для мікроконтролерної частини (додаток А).

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 42 p., 23 fig., 2 appendices, 10 sources.

NON-CONTACT INSPECTION, OPTICAL COMPONENTS, LENS QUALITY, QUADRANT PHOTODETECTOR, SCANNING, RAY TRACING, TRACEPRO, GLASS DEFECTS, HAZE.

Object of study is an information-and-measurement system for non-contact assessment of optical component quality.

The aim is to substantiate a non-contact approach to lens quality assessment based on the displacement of the beam energy centroid, and to develop the optical configuration and the data-processing algorithm.

Methods include theoretical analysis, computer simulation, and algorithmic data processing.

An optical scheme is proposed and simulated in TracePro for the nominal case and for defect models (bubbles, schlieren/striae, haze). An algorithm for estimating the beam energy-centroid coordinates from a four-segment photodetector is proposed, together with a procedure for mapping deviations over the lens aperture during scanning. A microcontroller data-acquisition program is provided (Appendix A).

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	7
Вступ.....	8
1 Теоретичні основи та методи безконтактного контролю оптичних компонентів.....	9
1.1 Дефекти лінз і методи їх виявлення	9
1.2 Закон Снелліуса.....	15
1.3 Дослідження оптичних елементів і систем методом Гартмана	17
2 Комп'ютерне моделювання.....	23
2.1 Побудова оптичної схеми пристрою	23
2.2 Моделювання наявності дефектів досліджуваної лінзи	26
3 Алгоритми обробки даних та результати імітаційних випробувань	31
Висновки	41
Перелік джерел посилання	42
Додаток А Текст коду програми для мікроконтролера.....	43
Додаток Б Демонстраційний матеріал	46

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ОС – оптична система;

ОД – оптична деталь;

АП – асферична поверхня;

КФП – квадрантний (чотирисегментний) фотоприймач;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ПЗ – програмне забезпечення;

TracePro – програмний пакет трасування променів.

ВСТУП

У роботі розглянуто підхід до безконтактного контролю якості лінз на основі реєстрації зміщення енергетичного центру лазерного пучка після проходження досліджуваного оптичного компонента. Наведено фізичні передумови методу та запропоновано структуру інформаційно-виміральної системи.

Мета роботи — обґрунтувати принцип методу, розробити оптичну схему та алгоритми обробки сигналів фотоприймача для виявлення дефектів оптичних компонентів.

Актуальність зумовлена потребою у підвищенні продуктивності та відтворюваності контролю оптичних деталей у виробничих умовах. На практиці значна частина операцій контролю виконується із залученням оператора та/або потребує тривалого налаштування, що підсилює вплив людського фактора та збільшує час вимірювань.

Наведені в роботі результати отримано методами теоретичного аналізу та комп'ютерного моделювання. Експериментальна верифікація та метрологічне калібрування запропонованої системи потребують окремого етапу виготовлення й налаштування лабораторного макета.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ ОПТИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ

1.1 Дефекти лінз і методи їх виявлення

Одним із ключових завдань у виробництві оптичних лінз є забезпечення стабільної якості продукції на всіх етапах технологічного циклу — від отримання заготовки до фінішної обробки оптичних поверхонь. Контролю підлягають як властивості матеріалу, так і геометрія та стан поверхонь, що визначають оптичні характеристики готового компонента.

До типових дефектів оптичного скла, які впливають на проходження та розсіювання випромінювання, належать:

- свилі (шліри) — неоднорідності показника заломлення у вигляді смуг/ниток;
- газові включення (бульбашки).

До геометричних і поверхневих параметрів, що характеризують якість виготовлення лінзи, відносять:

- радіус(и) кривизни робочих поверхонь;
- шорсткість поверхні;
- відхилення форми (зокрема асферичність поза допуском);
- локальні дефекти поверхні (хвилястість, “брижі”, сліди обробки).

Для оцінювання зазначених параметрів застосовують різні методики контролю (контактні й безконтактні), вибір яких визначається типом дефекту, вимогами до точності та етапом виробництва [1–2].

Перш ніж розглядати методи вимірювання, варто згадати, що являє з себе кожен дефект і що тягне за собою його наявність в оптичних системах.

Перед аналізом конкретних методів доцільно коротко охарактеризувати природу основних дефектів і їхній вплив на роботу оптичних систем. Дефектами скла вважають включення або неоднорідності в об’ємі матеріалу, оптичні властивості яких відрізняються від властивостей основної маси скла. Причинами появи дефектів можуть бути порушення технологічних режимів

підготовки шихти, плавлення та гомогенізації, а також відхилення умов транспортування й обробки матеріалу. Наявність таких дефектів призводить до локальних змін показника заломлення та/або додаткового розсіювання світла, що викликає спотворення хвильового фронту і погіршує якість формування зображення. Тому ідентифікація дефектів та оцінювання їхнього впливу є необхідною складовою контролю якості оптичних компонентів.

До дефектів склославу (скломаси) відносять газові включення, оптичні неоднорідності (свилі/шліри) та тверді включення (камені). Найпоширенішими є газові включення у вигляді бульбашок, які за характерними розмірами та оптичними ознаками умовно поділяють на такі типи:

а) дрібні бульбашки (орієнтовно 1–2 мм; у виробничій практиці інколи називають «мошки»), поява яких може бути пов'язана з недостатнім освітленням (рафінуванням) скломаси за несприятливих температурно-часових режимів;

б) бульбашки середніх/відносно великих розмірів, інколи з мутно-білим або слабко синюватим відтінком, що можуть виникати внаслідок неповного перебігу реакцій газоутворення/розкладання окремих компонентів (зокрема сульфатних добавок, якщо вони застосовуються в технології);

в) великі незабарвлені бульбашки, які зазвичай пов'язані з порушенням режимів плавлення, гомогенізації або дегазації скломаси.

Склоподібні включення (свилі або шліри) являють собою локальні ділянки скла з відмінним показником заломлення порівняно з основною масою матеріалу. Вони мають вигляд смуг або ниток; їх орієнтація та просторовий розподіл залежать від умов формування потоку скломаси. Основною причиною появи свилів є неоднорідність скла (неповна гомогенізація, градієнти складу та/або температури), що призводить до локальних оптичних неоднорідностей і спотворення проходження випромінювання через оптичний елемент.

Як газові включення, так і свилі/шліри в багатьох випадках можуть бути виявлені під час візуального контролю у прохідному/відбитому світлі (залежно від прозорості, товщини та вимог до чутливості методу).

Тверді включення (камені) у склі поділяють на:

- шихтні (матеріальні) — нерозплавлені частинки компонентів шихти;
- шамотні — включення, пов'язані з руйнуванням вогнетривких матеріалів печі;
- включення розкристалізації (девітрифікації) — фази, що можуть випадати зі скла у вигляді мінеральних частинок.

Визначення природи твердих включень є більш складним і, як правило, потребує мікроскопії та порівняльного аналізу за морфологічними/оптичними ознаками (а за потреби — додаткових методів ідентифікації).

Працездатність оптичного приладу значною мірою визначається якістю оптичних деталей та точністю складання оптичної системи. Своєчасний контроль похибок оптичних поверхонь у процесі виготовлення забезпечує технологічний зворотний зв'язок: чим точніше визначено відхилення форми, тим ефективніше можна скоригувати режим обробки та наблизити поверхню до заданого профілю.

Упродовж технологічного циклу виготовлення оптичної деталі здійснюють контроль відповідності процесу формоутворення заданим параметрам. У міру наближення до фінішних операцій вимоги до точності контролю зростають, тому засоби контролю змінюються від контактних і відносно грубих до прецизійних безконтактних.

Кривизну сферичних поверхонь на етапі шліфування перевіряють шаблонами або притиральним інструментом, а після тонкого шліфування та полірування контролюють сферометрами, пробними (контрольними) стеклами та інтерферометрами.

Під час виготовлення асферичних поверхонь застосовують методи контролю, чутливі до локальних відхилень профілю (зокрема тіньовий метод), а їх атестацію та остаточну перевірку, як правило, виконують інтерференційними методами.

Для чисельного оцінювання радіуса кривизни сферичних поверхонь і пов'язаних з ним відхилень форми застосовують сферометри, які вимірюють стрілку прогину (стрілку сферичного сегмента) на заданій базі.

На рис. 1.1 наведено індикаторний сферометр. Прилад складається з корпусу (2) з настановним базовим кільцем; вздовж осі корпусу розміщено вимірювальний стрижень індикатора (3). Перед вимірюванням сферометр налаштовують за еталонним зразком, встановлюючи показ індикатора на нульову відмітку шкали, після чого прилад встановлюють на контрольовану сферичну поверхню (1).

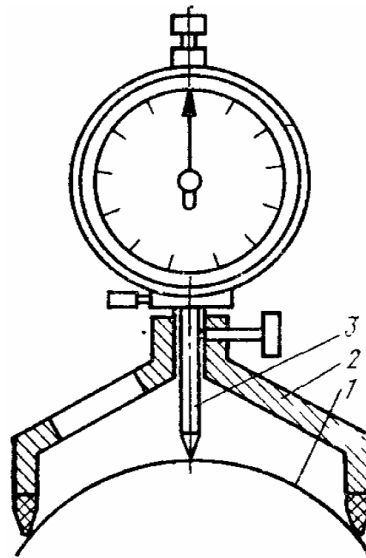


Рисунок 1.1 – Накладний індикаторний сферометр

Відхилення стрілки від нульового відліку вказує на різницю між радіусом контрольованої сфери та радіусом еталона. Допустиме відхилення стрілки індикатора розраховується заздалегідь.

Радіуси кривизни опуклих і увігнутих шліфованих і полірованих сферичних поверхонь вимірюють сферометром ІЗС-7. Принцип вимірювання той самий, що у індикаторного сферометра, але точність відліку складає 0,001 мм.

За допомогою тіньового методу можна давати кількісну оцінку неоднорідності скла. Тіньовий метод дозволяє безпосередньо контролювати

поверхню, виключаючи використання допоміжних поверхонь або компенсаторів, які вносять власні додаткові похибки. Найвідомішим є тіньовий метод Фуко [1], принципова діаграма якого показана на рис. 1.2. Вид тіньових візерунків – рис. 1.2, а; при різних положеннях ножа – рис. 1.2, (б-д); розподіл світлової енергії на кромці леза – рис. 1.2, ж; тіньовий візерунок Фуко крупним планом – рис. 1.2, з.

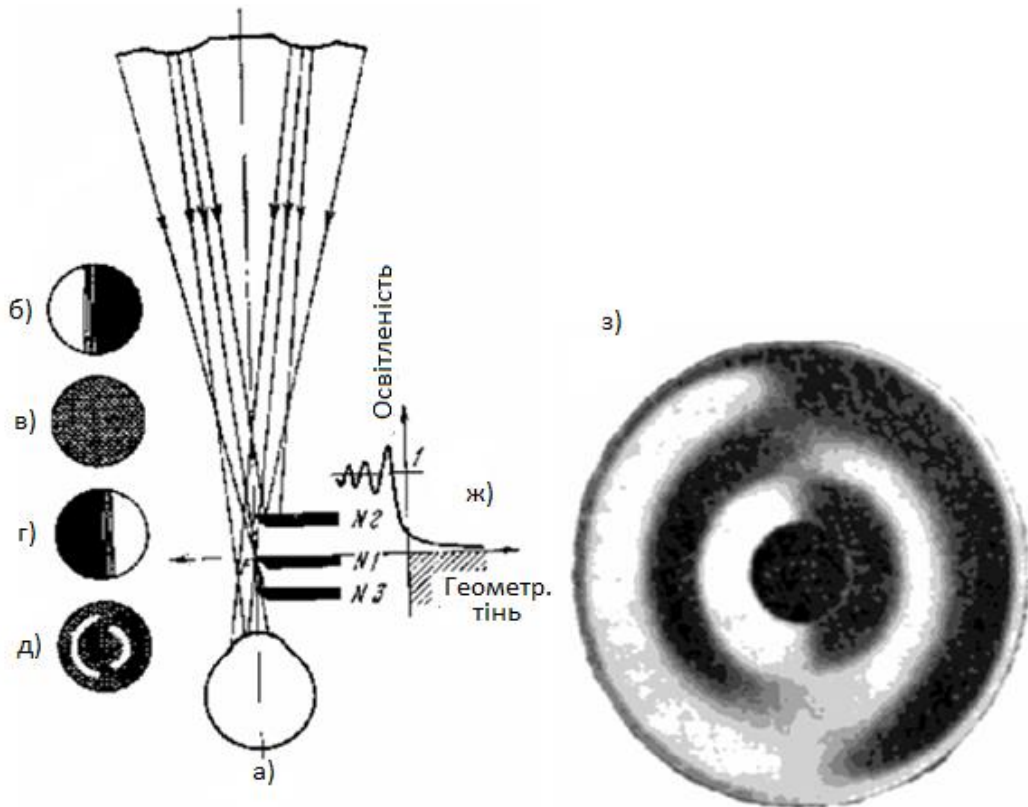


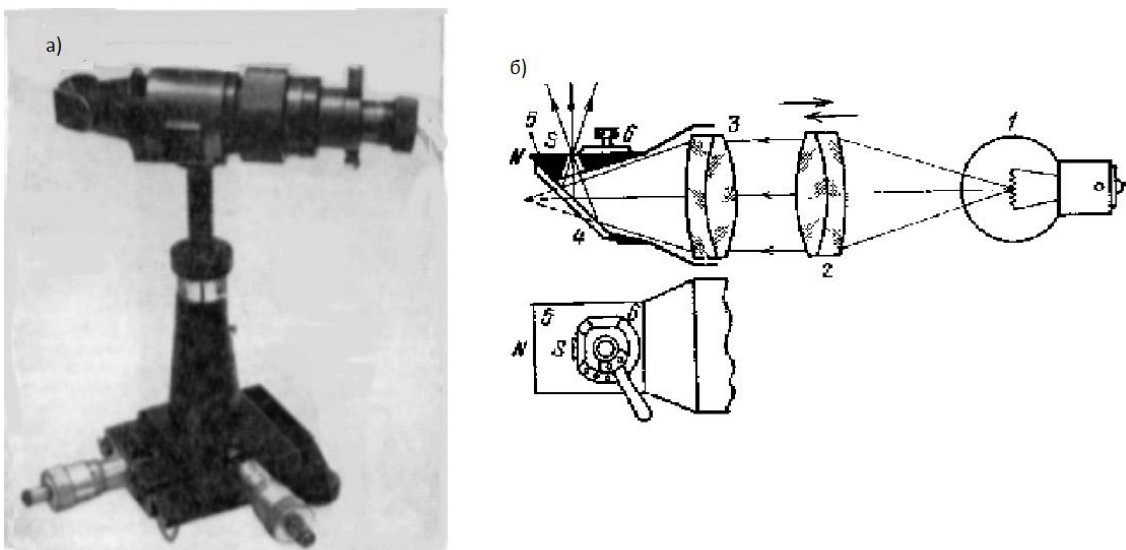
Рисунок 1.2 – Принципова схема тіньового методу

Світло від лампи 1 за допомогою лінз 2 і 3 фокусується у вікно S точкової діафрагми, звідки спрямовується на контрольовану поверхню або ОС (рис. 1.2, б). Джерело світла S має розташовуватися в центрі кривизни досліджуваної поверхні або у фокусі контрольованої ОС так, щоб відбитий промінь потрапляв на ніж Фуко N.

Якщо розмістити око безпосередньо за фокусом (рис. 1.2, а), то побачимо останню поверхню ОС, заповнену світлом. Якщо гостре лезо ножа N1 (так званого ножа Фуко) помістити у фокус, то при його переміщенні в

площині, перпендикулярній до оптичної осі в напрямку, вказаному стрілкою, у міру того, як ніж перекриває зображення, яке ніколи не буває нескінченно малим, випробувана поверхня буде рівномірно «згасати». Якщо ніж знаходиться не зовсім у фокусі, то при його зміщенні поперек оптичної осі спостерігачеві буде здаватися, що на поверхню, яка світиться, падає тінь. Ця тінь буде проходити збоку від ножа, якщо він знаходиться перед фокусом (випадок N2), або до ножа, якщо він знаходиться позаду фокусу (випадок N3).

Конструкція реального пристрою показана на рис. 1.3.



а) загальний вигляд; б) схема підсвічування щілини; 1 – лампа; 2 і 3 – лінзи; 4 – дзеркало; 5 – непрозорий екран; 6 – екран регулювання ширини щілини S ; N – ніж.

Рисунок 1.3 – Конструкція тіньового пристрою

Якщо хвильовий фронт має якусь похибку – зональну (як це зображено на рис. 1.2) або місцеву, то частина променів ножем перетнеться раніше і відповідна ділянка поверхні затіниться, частина променів, навпаки, проходить повз ніж навіть тоді, коли вся поверхня «згасла». Відповідну частину поверхні або її зону буде видно світлою.

При зональних похибках ліва і права частини поверхні мають протилежні розподіли освітлення, що створює враження рельєфу (рис. 1.2, з), відповідного справжньому рельєфу поверхні.

1.2 Закон Снелліуса

Основним фізичним явищем у даному експерименті є закон Снелліуса [4], представлений на рис. 1.4 [2–3].

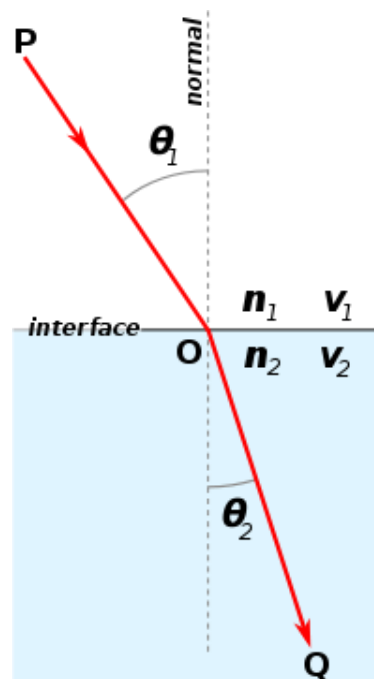


Рисунок 1.4 – Ілюстрація закону Снелліуса

Ця схема відповідає формулі:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2), \quad (1.1)$$

де n_1 – показник заломлення середовища, з якого світло падає на поверхню розділу;

θ_1 – кут падіння світла – кут між променем, що падає на поверхню, і нормаллю до поверхні;

n_2 – показник заломлення середовища, в яке потрапляє світло після проходження межі розділу;

θ_2 – кут заломлення світла – кут між променем, що проходить через поверхню, і нормаллю до поверхні.

З цих змінних констант, або заздалегідь відомою величиною, можна назвати тільки показник заломлення середовища, з якого падає промінь – це і є показник заломлення повітря, у тому випадку, якщо параметри скла не змінюються.

З рівняння (1.1) можна оцінити вплив зміни показника заломлення матеріалу на відхилення променя. Зокрема, якщо показник заломлення досліджуваного середовища змінюється на $\Delta n_2 = 0,01$ відносно заданого значення, то кут заломлення зміниться на $\Delta\theta_2$, що відповідає додатковому кутовому відхиленню променя:

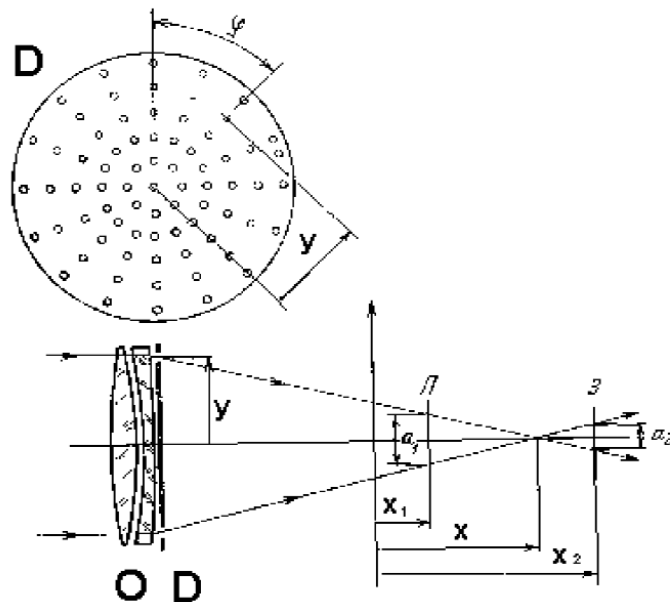
$$a \sin(0,01) = 0,573^\circ. \quad (1.2)$$

На екрані, розташованому на відстані $L = 100$ мм, таке кутове відхилення відповідає лінійному зміщенню плями порядку $\Delta x \approx 0,998$ мм. Таке зміщення може бути зареєстроване фоточутливим приймачем (зокрема чотири сегментним) і використане як інформативний параметр для оцінювання відхилень оптичного елемента.

За наявності на поверхні лінзи локальних дефектів форми (виступів/впадин, хвилястості тощо) змінюється напрямок нормалі до поверхні в точці падіння променя. У цьому випадку кути падіння та заломлення (θ_1 і θ_2) у рівнянні (1.1) набувають інших значень, що призводить до додаткового відхилення траєкторії лазерного променя та, відповідно, до дисбаланса у приймальному каналі системи.

1.3 Дослідження оптичних елементів і систем методом Гартмана

Метод Гартмана — один із класичних підходів до кількісного оцінювання якості оптичних систем (об'єктивів, дзеркальних і лінзових елементів), який базується на аналізі просторового розподілу променів, що проходять через різні зони апертури. Для реалізації методу використовують діафрагму (маску) Гартмана — екран з набором отворів, симетрично розташованих у межах апертури. Маску встановлюють поблизу контрольованого об'єктива, забезпечуючи проходження променів через визначені зони (рис. 1.5).



D – діафрагма Гартмана; O – випробувана лінза; П – передфокальне положення фотопластинки; З – постфокальне положення фотопластинки.

Рисунок 1.5 – Принцип методу Гартмана

У класичному варіанті методу формують два зображення (або два положення реєструвальної площини): одне — при розташуванні реєструвальної площини перед фокальною площиною (П); інше — за нею (З).

Порівняння координат світлових плям, сформованих окремими зонами маски, у двох положеннях дозволяє оцінити кутові відхилення променів і, відповідно, зробити висновки щодо аберацій та відхилень форми хвильового фронту. Критичним параметром є точне знання відстані між двома положеннями реєструвальної площини ($x_2 - x_1$), оскільки вона безпосередньо впливає на результат розрахунку [3–6].

Під час реєстрації зображення через маску (діафрагму) Гартмана світловий потік проходить крізь окремі отвори у вигляді вузьких пучків і формує на реєструвальній площині набір локальних світлових плям. Для подальших розрахунків визначають координати або взаємні відстані між плямами, що відповідають симетрично розташованим отворах маски.

Нехай a_1 та a_2 — відстані між мітками (центрами плям), що відповідають симетричним отворах діафрагми, виміряні у двох положеннях реєструвальної площини (перед фокальною площиною та за нею). Тоді положення фокальної площини для розглядуваної зони апертури визначається співвідношенням:

$$x(y) = x_1 + \frac{x_1}{x_1 + x_2} \cdot (x_2 - x_1). \quad (1.3)$$

Аналогічні розрахунки виконують для інших зон апертури об'єктива, визначаючи відповідні значення x (або y) для кожної з них. Отримана залежність $x(y)$ від радіальної координати зони характеризує поздовжню сферичну аберацію (у сенсі зміщення положення фокуса для різних зон апертури).

Для отворів, розташованих уздовж різних діаметрів діафрагми Гартмана, функції x та y можуть відрізнитися. Така відмінність свідчить про наявність астигматизму, оскільки фокусні положення в ортогональних меридіанах не збігаються.

Середнє положення фокуса для об'єктива в цілому визначають за виразом:

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum yx(y)}{\sum y}. \quad (1.4)$$

Г. Бек і Г. Фелкамм запропонували модифікацію методу Гартмана, у якій отвори діафрагми розміщують не по концентричних колах, а у вершинах ортогональної сітки в шаховому порядку. За такого розміщення кожному отвору відповідає приблизно однакова ділянка апертури об'єктива. Це спрощує математичну обробку результатів і дозволяє оцінювати концентрацію енергії в колі заданого діаметра в площині найкращого фокусування.

За умови попереднього точного вимірювання координат отворів діафрагми, для розрахунків може бути достатньо отримання одного зображення — у передфокальному або післяфокальному положенні реєструвальної площини. Діаметр зображення зірки у площині середнього фокуса $x_{\text{ср}}$, виражений у стотисячних частках фокусної відстані f об'єктива, визначається за співвідношенням:

$$T = \frac{200000 \sum y^2 (x(y) - x_{\text{ср}})}{\sum y}. \quad (1.5)$$

Тут поперечним абераціям зони у надається вага, пропорційна площі цієї зони. Величина T , введена Г. Леманом, називається технічною постійною або постійною Гартмана лінзи. Вона характеризує якість лінзи. Лінза вважається першокласною при $T < 0,5$, хорошою при $T < 1,5$ і доброю при $T < 2,5$. Тепер ці критерії слід вважати занадто ліберальними. Діаметр отворів діафрагми Гартмана і величини зміщення негативу від фокальної площини необхідно вибирати, з одного боку, так, щоб зображення крапок не зливалася, а з іншого, щоб їх розмір, викликаний дифракцією, не був занадто великим. Рекомендується використовувати отвори діаметром $d = f/500$, розташовуючи їх на відстані $l = f/200$ один від одного, і видаляти субфокальні та передфокальні зображення на відстані.

$$x - x_1 = f' \frac{1}{\frac{2\pi}{1,5 \times 10^4 \gamma} l \frac{f'}{\varphi} + 1}, \quad x - x_1 = f' \frac{1}{\frac{2\pi}{1,5 \times 10^4 \gamma} l \frac{f'}{\varphi} - 1} \quad (1.6)$$

де φ – відстань діафрагми від фокуса

Атмосферні збурення зумовлюють випадкові зміщення позафокальних плям у часі, причому траєкторії зміщень для різних плям можуть відрізнятися. За короткої експозиції положення кожної плями на реєструвальному носії формується під істотним впливом випадкових атмосферних флуктуацій. Для зменшення цього впливу застосовують усереднення за часом, тобто збільшують експозицію (у практиці астрономічних вимірювань — до десятків секунд, наприклад ≈ 20 с).

У класичному викладі метод Гартмана ґрунтується на припущенні, що оптична система має переважно зональні симетричні аберації. На практиці завжди наявні також локальні похибки. Для їх аналізу Н. Майал і С. Василевські запропонували визначати не попарні відстані між плямами, а їхні прямокутні координати. Оскільки немає гарантії точного розташування точкового джерела на оптичній осі, під час обробки результатів необхідно враховувати можливу кому.

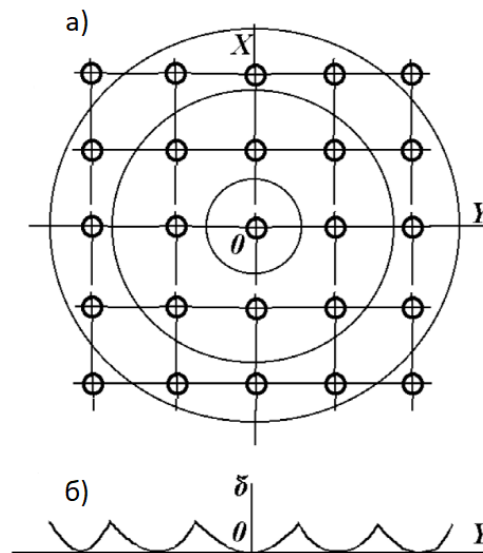
Сукупність вимірювань формує систему рівнянь, за якою можна визначити координати оптичного центра, зміщення джерела відносно нього та параметри поверхні, що найкраще наближає істинну форму дзеркала (або іншого оптичного елемента). Водночас слід враховувати, що метод Гартмана не надає інформації про локальні похибки поверхні, розташовані між отворами діафрагми. Найбільш доцільним є його застосування для кількісного контролю на завершальних етапах виготовлення оптичних поверхонь і для сертифікації готових виробів. Слід зазначити, що для вивчення ОС за методом Гартмана потрібна наявність:

- а) чудових умови спостереження;
- б) відмінно відрегульовану паралактичну установку;

- в) точної діафрагми великого діаметра;
- в) фотолабораторії.

Перелічені умови є типовими для обсерваторних вимірювань. Важливо, що в практичному застосуванні метод Гартмана фактично оцінює не лише властивості оптичної системи, а й сукупну якість налаштування вимірювального тракту (вирівнювання, юстування, стабільність реєстрації).

Під час тестування за методом Гартмана на фотопластинці або на матриці визначають координати центрів плям, сформованих окремими отворами діафрагми, та оцінюють їх зміщення відносно теоретично очікуваного положення. Такий підхід не дозволяє безпосередньо врахувати локальні похибки, розташовані в області між отворами, і обмежує просторову роздільну здатність контролю апертури. Крім того, значна частина зіниці (апертури) оптичної системи перекривається діафрагмою (у типовому випадку — до $\sim 80\%$), тому окремі компоненти аберацій можуть залишатися «прихованими». Рис. 1.6 ілюструє приклад косинусоїдальної похибки, що маскується діафрагмою Гартмана.



а) вид діафрагми в плані; б) перетин АП;

δ – відхилення реального профілю АП від теоретичного.

Рисунок 1.6 – Помилки профілю АП, «приховані» діафрагмою Гартмана

Перелічені недоліки методу Гартмана призводять до втрати інформації, а отже до зниження його рейтингу, тому при визначенні шуканих величин будемо приймати їх рівними відповідним значенням тіньового методу.

2 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Побудова оптичної схеми пристрою

На основі ідей методу Гартмана у роботі запропоновано підхід до якісного оцінювання лінз, що ґрунтується на скануванні апертури лазерним пучком та реєстрації зміщення енергетичного центру (центра інтенсивності) повернутого пучка за сигналами чотирисегментного фотоприймача. На відміну від класичного методу Гартмана, запропонована конфігурація забезпечує послідовне зондування поверхні лінзи із заданим кроком сканування, що створює передумови для формування карти відхилень у межах апертури.

Інформативним параметром системи є розподіл сигналів між сегментами фотоприймача, розташованого у площині, перпендикулярній до оптичної осі досліджуваного зразка, що дозволяє визначати координати енергетичного центру пучка та відстежувати їх зміни під час сканування.

На рис. 2.1 наведено оптичну схему пристрою, до складу якої входять: лазер (1), світлодільний куб (2), коліматор (3), досліджувана лінза (4), відбивне дзеркало із зовнішнім відбивним шаром (5), поворотний механізм з азимутальним і радіальним відхиленням (6) та чотирисегментний фотоприймач (7).

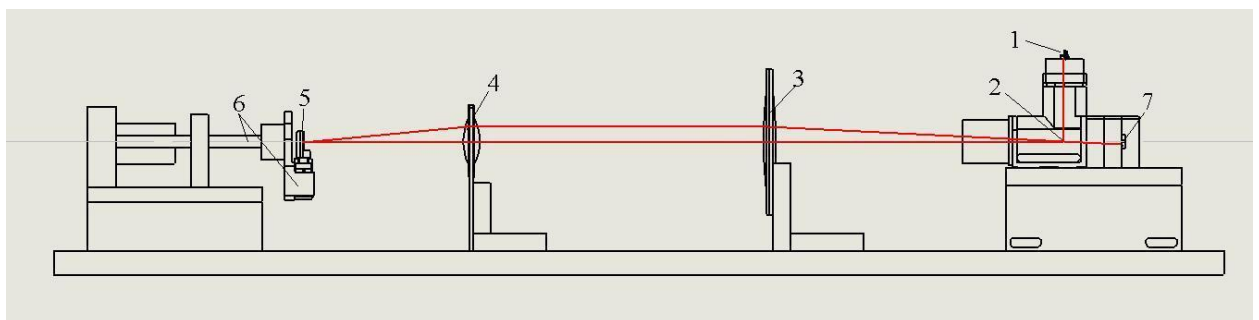


Рисунок 2.1 – Оптична конструкція приладу

Запропоновану оптичну схему реалізовано в програмному пакеті TracePro для проведення імітаційних досліджень. Результати моделювання демонструють коректність траєкторії променя для обраної конфігурації та підтверджують, що за заданих параметрів оптичної системи пучок повертається в приймальну площину фотоприймача. Крім того, моделювання показує зміну параметрів пучка (зокрема положення енергетичного центру) у випадках без дефектів і за наявності змодельованих дефектів (рис. 2.2) [7–9].

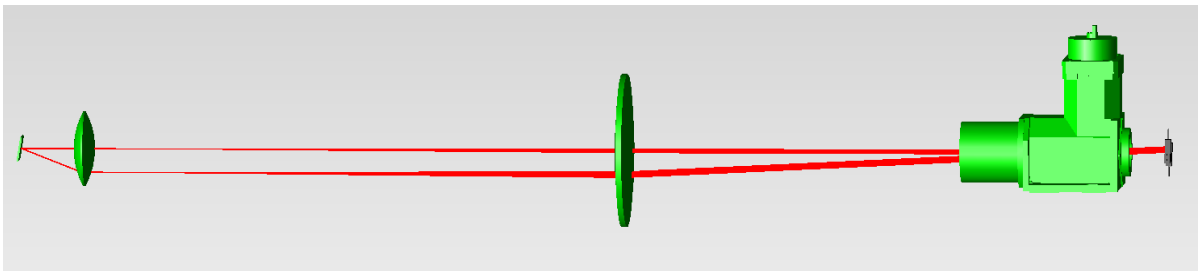


Рисунок 2.2 – Оптична конструкція пристрою, змодельованого в програмному пакеті Trace Pro

Принцип роботи пристрою полягає в такому. Колімований промінь від стабілізованого лазерного джерела через світлодільний елемент вводиться в оптичний тракт системи. Далі промінь проходить через об'єтив та досліджувану лінзу і спрямовується на відбивне дзеркало. За номінального (нульового) положення відхиляючого механізму промінь відбивається у зворотному напрямку та, проходячи знову через досліджувану лінзу й об'єтив, повертається до світлодільного куба і фокусується (проектується) на чотири сегментний фотоприймач.

Узгодження параметрів об'єктива та досліджуваної лінзи (зокрема фокусних відстаней у вибраній конфігурації) забезпечує формування пучка в приймальній площині без суттєвого виходу за межі апертури фотоприймача. У разі відхилення дзеркала від номінального положення змінюється напрямок променя в тракті (рис. 2.3), однак геометрія системи зберігає його повернення

в приймальну площину, що дозволяє реєструвати відповідні зміни положення енергетичного центру пучка.

Таким чином реалізовано збалансовану оптичну конфігурацію, у якій кероване відхилення дзеркала змінює траєкторію лазерного променя, але забезпечує його проєкцію на фотоприймач у всьому робочому діапазоні відхилень.

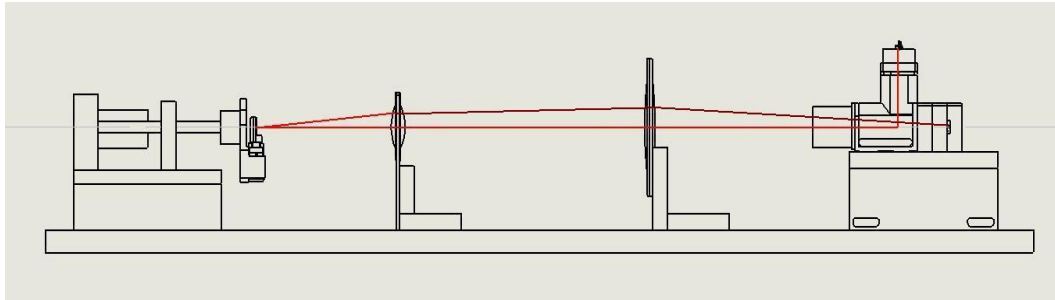


Рисунок 2.3 – Хід променя у разі наявності дефекту (свилі) у лінзі

Для оцінювання стану всієї робочої апертури лінзи необхідно виконати сканування її поверхні з заданим (мінімально допустимим) кроком, що забезпечує потрібну просторову роздільну здатність контролю. Для опису положень під час сканування доцільно використовувати полярну (радіальну) систему координат.

Під час вимірювань реєструють сигнали чотирьох сегментів фотоприймача (пропорційні інтенсивності/потужності випромінювання у відповідних секторах) та параметри положення відхиляючого дзеркала. Для подальшої обробки формується таблиця даних, що містить, зокрема, азимутальний кут та радіальний кут (або еквівалентні керувальні параметри) положення дзеркала, за якими визначається координата точки зондування на поверхні лінзи.

За вимірними значеннями сигналів чотирьох сегментів обчислюють координати енергетичного центру (центра інтенсивності) плями. Подальший аналіз полягає у встановленні зв'язку між координатами точки сканування на

лінзі та зміщенням енергетичного центру в приймальній площині, що дозволяє будувати діаграми/карти відхилень у межах апертури.

2.2 Моделювання наявності дефектів досліджуваної лінзи

На першому етапі розглянуто номінальний випадок (без дефектів), у якому повернуте лазерне випромінювання потрапляє на чотирисегментний фотоприймач так, що енергетичний центр (центр інтенсивності/потужності) плями збігається з геометричним центром фотоприймача (рис. 2.4). Цей режим використано як еталонний для подальшого порівняння.

Далі виконано формалізацію результатів моделювання: визначено спосіб обчислення координат енергетичного центру за сигналами сегментів фотоприймача та введено показники, за якими кількісно оцінюється відхилення від еталонного режиму. На основі цих співвідношень у наступних підпунктах проаналізовано зміни параметрів пучка при введенні моделей дефектів лінзи [7].

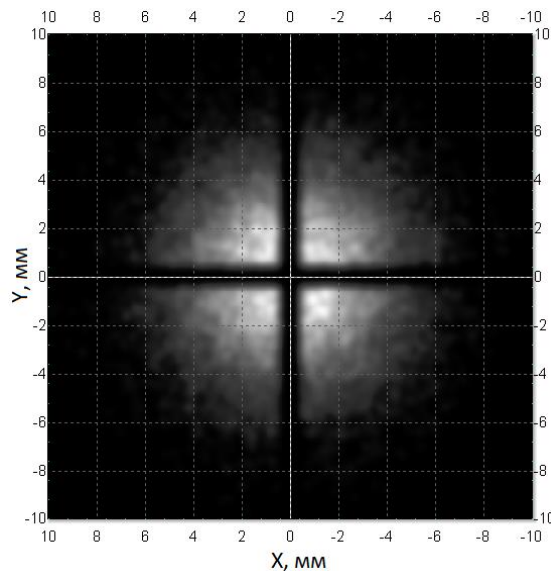


Рисунок 2.4 – Гауссовий розподіл енергії у фотоперетворювачі в стані балансу системи

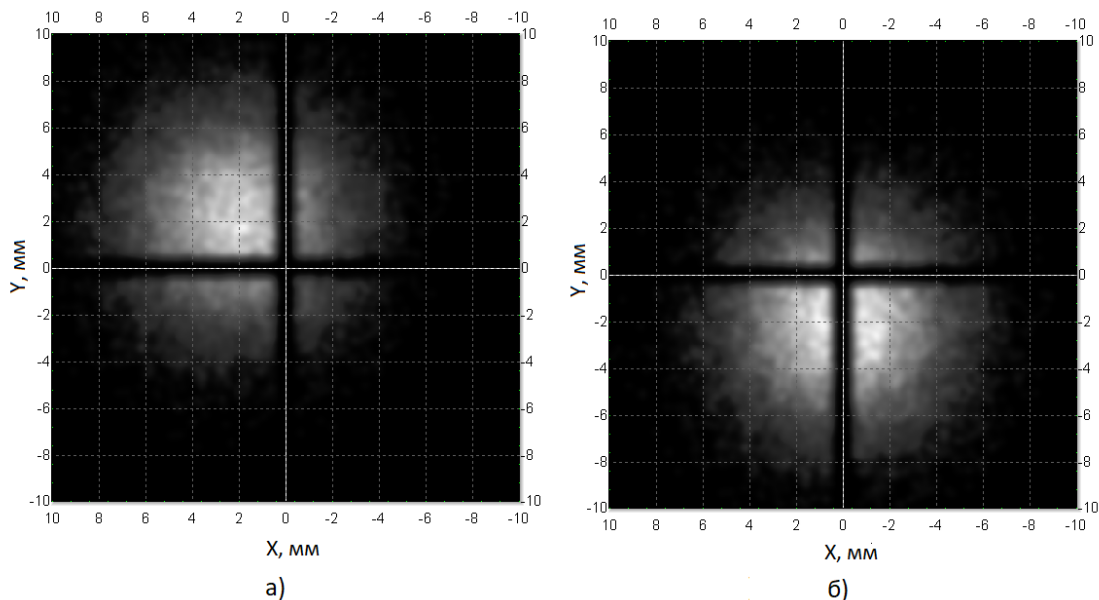
Представимо сигнали чотирьох сегментів фотоприймача у вигляді векторів у нормованій системі координат [5]. Початок кожного вектора розміщено в початку координат, а напрям задається положенням відповідного

сегмента відносно центра фотоприймача: для першого сегмента — (1; 1), для другого — (-1; 1), для третього — (-1; -1), для четвертого — (1; -1). Модуль кожного вектора пропорційний вимірюваному сигналу (інтенсивності/потужності) відповідного сегмента. Тоді вектор, що відповідає положенню енергетичного центру лазерної плями, визначається як зважена сума векторів сегментів:

$$\bar{I}_0 = \overline{I_{(1,1)}} + \overline{I_{(-1,1)}} + \overline{I_{(-1,-1)}} + \overline{I_{(1,-1)}}. \quad (2.1)$$

У номінальному режимі (за відсутності зміщення плями) сигнали всіх сегментів є однаковими, тому зважена сума векторів дорівнює нулю, а розраховані координати енергетичного центру збігаються з геометричним центром фотоприймача.

У разі зміщення плями відносно центра фотоприймача розподіл інтенсивності між сегментами стає нерівномірним. Відповідно, сума векторів набуває ненульового значення, що відповідає координатам зміщення енергетичного центру (рис. 2.5).



а) зсув енергетичного центру вгору і вліво;

б) зсув енергетичного центру вниз.

Рисунок 2.5 – Варіанти відхилення променя

Точність визначення координат енергетичного центру в запропонованому підході суттєво залежить від характеристик вимірювального тракту, зокрема від власних шумів фотоприймача, шумів підсилювального каскаду та роздільної здатності аналого-цифрового перетворювача. Додатковий внесок можуть робити джерело випромінювання (стабільність потужності/положення), механічні збурення та похибки юстування, тому під час подальшої експериментальної верифікації ці фактори мають бути враховані.

Запропонований спосіб реєстрації дозволяє фіксувати відхилення променя у збалансованій оптичній конфігурації та, на підставі отриманих даних, оцінювати можливі причини зміщення енергетичного центру. Однією з причин розбалансування можуть бути дефекти досліджуваної лінзи, зокрема:

- газові включення (бульбашки);
- свилі (шліри);
- дефекти поверхні (локальні виступи/впадини, подряпини);
- неоднорідність шліфування/полірування (хвилястість, зональність);
- помутніння (зростання розсіювання).

Відповідно до закону Снелліуса, навіть невеликі зміни параметрів середовища або локальні зміни нормалі до поверхні можуть спричинити зміну напрямку променя та, як наслідок, зміщення плями в приймальній площині. За наявності в матеріалі включень у вигляді бульбашок або сторонніх частинок виникає розсіювання на неоднорідностях скла (рис. 2.6), що впливає на форму плями та розподіл інтенсивності [7].

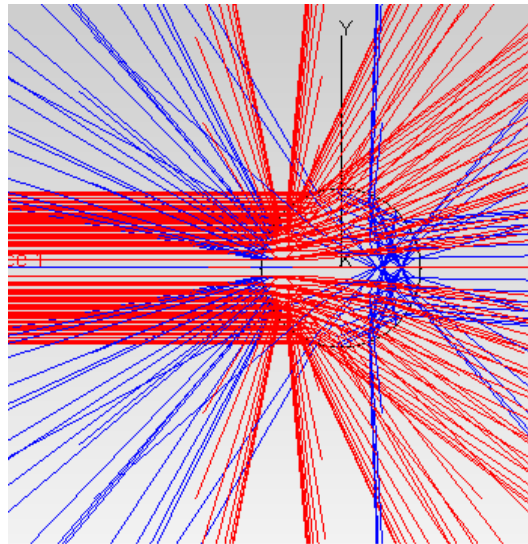


Рисунок 2.6 – Розсіювання променя на бульбашці повітря,
що знаходиться в склі

У цьому випадку до фотоприймача надходить випромінювання з меншою інтегральною потужністю та зі зміщеним енергетичним центром (центром інтенсивності) плями (рис. 2.7).

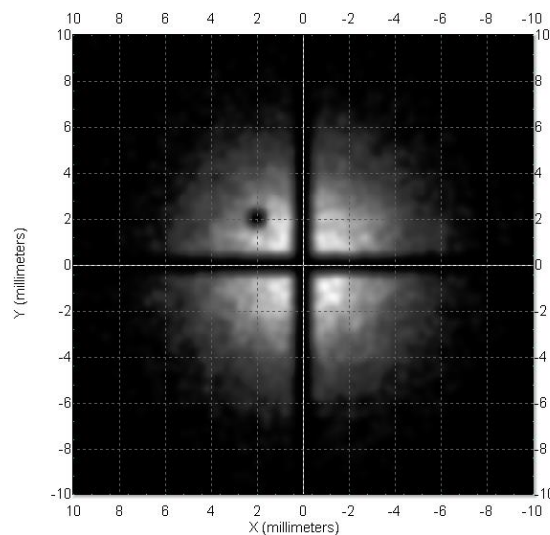


Рисунок 2.7 – Моделювання наявності в лінзі бульбашок повітря

При наявності помутнінь в лінзах спостерігається загальне розсіювання енергії лазерного променя при збереженні енергетичного центру лазерного

променя. Результат моделювання наявності помутніння в лінзах у програмі Trace Pro, представлений на рис. 2.8.

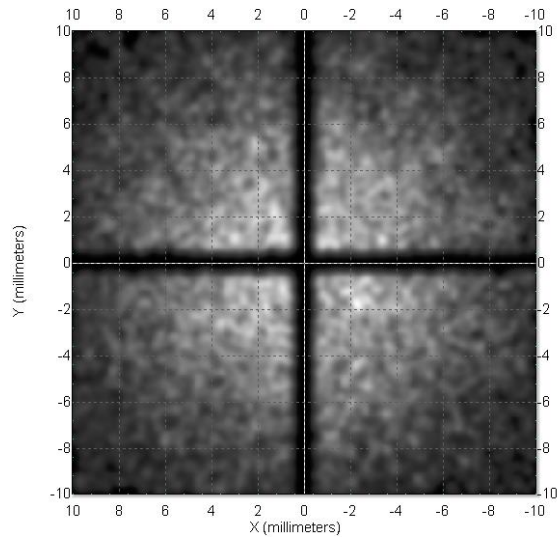


Рисунок 2.8 – Результат моделювання наявності помутніння в лінзах

3 АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ ДАНИХ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Первинні дані, сформовані мікроконтролерною частиною, потребують перетворення для подальшого аналізу та візуалізації результатів. Зокрема, за вимірними сигналами чотирьох сегментів фотоприймача необхідно визначити напрямок і величину зміщення енергетичного центру (центра інтенсивності) лазерної плями в приймальній площині відносно її номінального положення.

Для цього сигнали сегментів подамо у вигляді векторів у нормованій декартовій системі координат. Напрямки векторів відповідають розташуванню сегментів відносно центра фотоприймача: для першого сегмента — (1; 1), для другого — (-1; 1), для третього — (-1; -1), для четвертого — (1; -1). Модуль кожного вектора пропорційний вимірному сигналу відповідного сегмента (інтенсивності/потужності у межах сегмента). Така постановка відповідає знакам координат у відповідних чвертях декартової площини.

Зміщення енергетичного центру плями визначається як зважена сума векторів сегментів. У номінальному режимі (без зміщення плями) сигнали всіх сегментів є однаковими, тому результуючий вектор дорівнює нулю. За нерівномірного розподілу інтенсивності між сегментами результуючий вектор є ненульовим і характеризує напрямок та відносну величину зміщення, що може бути обчислено за виразом [5–10]:

$$\bar{I}_0 = \overline{I_{(1,1)}} + \overline{I_{(-1,1)}} + \overline{I_{(-1,-1)}} + \overline{I_{(1,-1)}}. \quad (3.1)$$

Другим інформативним параметром є сумарний сигнал чотирьох сегментів фотоприймача (інтегральна інтенсивність/потужність у приймальній площині) [10]. За сталих умов вимірювання та за відсутності додаткових втрат, пов'язаних із дефектами (розсіюванням, поглинанням або винесенням

частини пучка за межі апертури приймача), цей сумарний сигнал є близьким до сталого та досягає максимального значення для номінального режиму [10]:

$$I_{summ} = |I_{(1,1)}| + |I_{(-1,1)}| + |I_{(-1,-1)}| + |I_{(1,-1)}|. \quad (3.2)$$

Для візуалізації результатів дослідження представимо їх у вигляді графіка (рис. 3.1). На цьому графіку координати X і Y є координатами поверхні лінзи в декартовій системі координат. Координата Z відповідає за довжину вектора без урахування його напрямку.

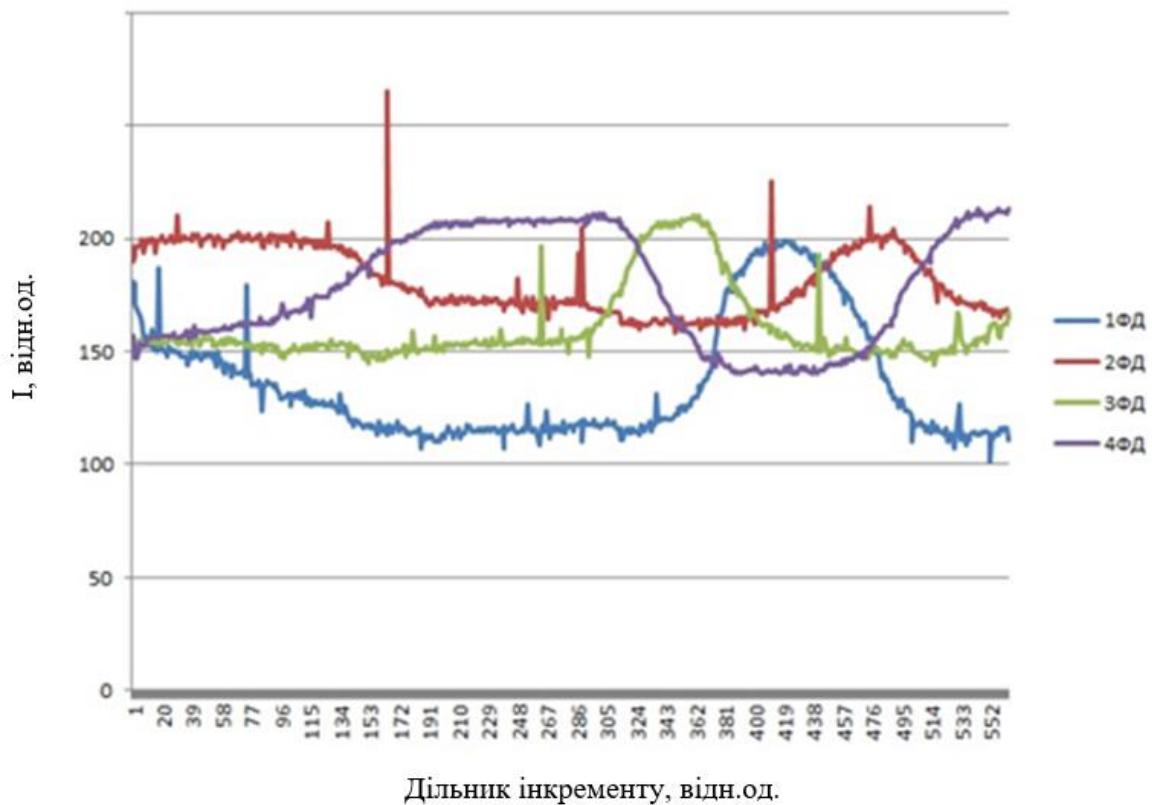


Рисунок 3.1 – Кількість світла, що падає на кожен сектор фотодетектора

Дані, що надходять з карти пам'яті або через послідовний порт персонального комп'ютера, подано у вигляді таблиці (масиву рядків), де: перший стовпець містить азимутальний кут відхилення, другий — радіальний

кут відхилення. Стовпці 3–6 містять вимірні значення вихідної напруги (або цифрові відліки АЦП) з чотирьох сегментів фотоприймача.

Розглянуто один повний оберт радіальної осі на 360° (500 відліків енкодера) за фіксованого азимутального кута дзеркала 7° відносно оптичної осі. Вимірні сигнали з чотирьох сегментів фотоприймача подано у вигляді графіків (рис. 3.2). Кожна крива відповідає сигналу (інтенсивності/потужності) у відповідному сегменті фотоприймача. По осі X відкладено номер відліку енкодера під час обертання дзеркала.

Після перетворення цих даних за наведеними співвідношеннями обчислено координати енергетичного центру плями для кожного значення радіального кута повороту дзеркала.

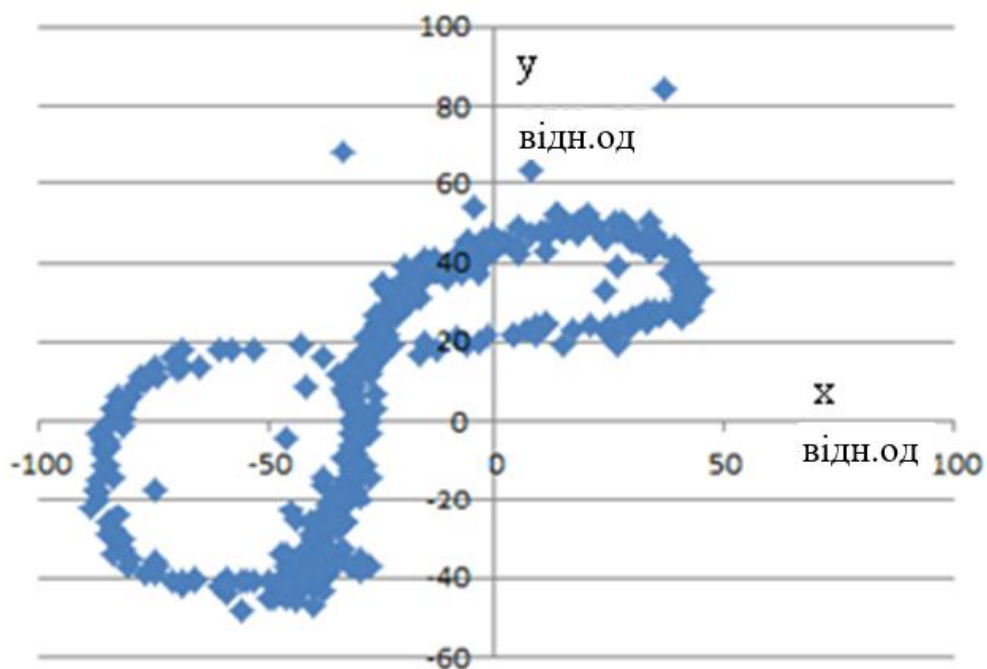


Рисунок 3.2 – Координати центру сили для повного повороту дзеркала з азимутальним відхиленням дзеркала на 7° відносно оптичної осі

Аналогічну обробку виконано для випадку відхилення дзеркала на 6° відносно оптичної осі. Результати у вигляді графіка зміщення енергетичного центру лазерної плями наведено на рис. 3.3.

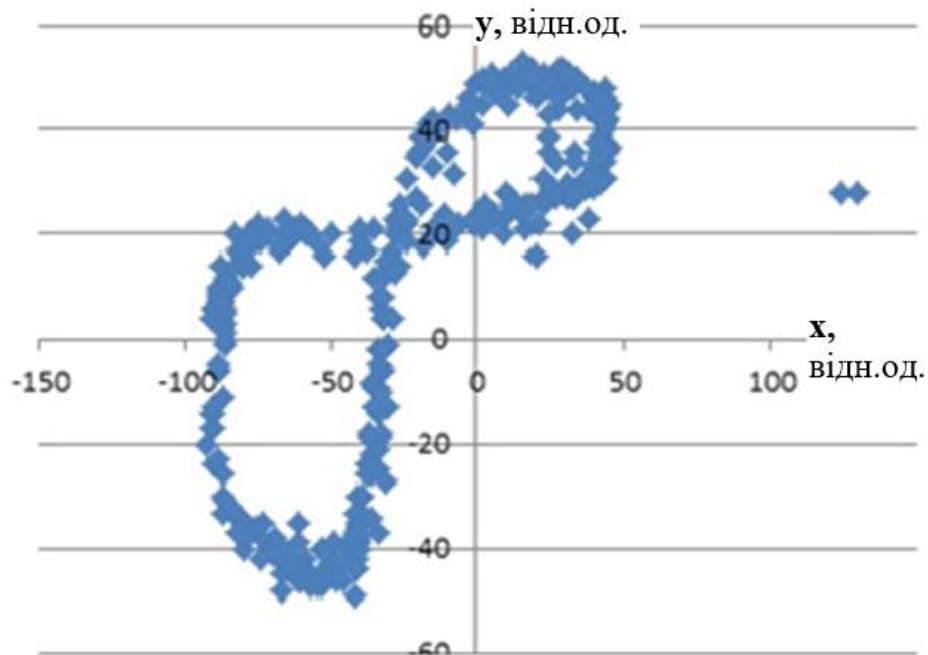


Рисунок 3.3 – Координати центру сили для повного повороту дзеркала з азимутальним відхиленням дзеркала на 6° відносно оптичної осі

Порівняння графіків, отриманих для різних азимутальних кутів відхилення за повного оберту (360°), показує, що загальний характер залежностей є подібним. Водночас між окремими реалізаціями спостерігаються відмінності (спотворення) форми, які можуть бути зумовлені похибками калібрування та юстування елементів оптичної схеми, а також обмеженнями вимірювального тракту. До таких чинників належать відмінності коефіцієнтів підсилення аналогових каскадів, квантування аналого-цифрового перетворювача, температурна нестабільність фотоприймача та додаткові шумові складові системи.

За потреби результати, отримані в полярній (круговій) системі координат, можуть бути перетворені в декартову систему координат, прив'язану до площини досліджуваної лінзи. Для виконання такого перетворення необхідно знати азимутальний і радіальний кути відхиляючого дзеркала, а також фокусну відстань досліджуваної лінзи. Графічну інтерпретацію відповідних геометричних співвідношень наведено на рис. 3.4.

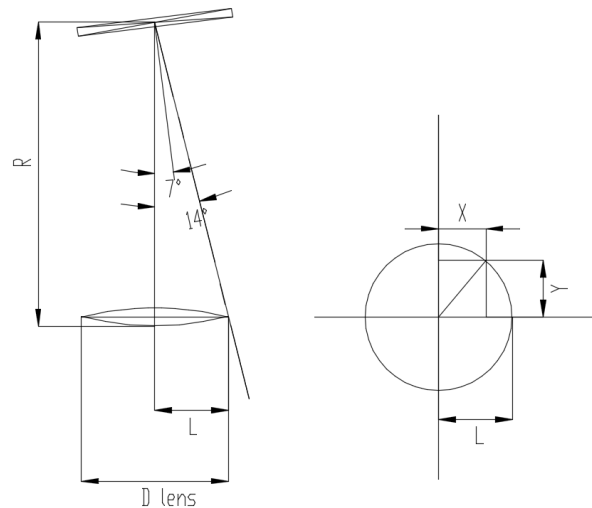


Рисунок 3.4 – Геометричний принцип перетворення з кругової системи координат у декартову

Потім, щоб знайти координати X і Y , застосовуємо прості тригонометричні формули:

$$y = L \sin(a), \quad (3.3)$$

$$L = F \tan(b), \quad (3.4)$$

де L – відстань, на яку точка віддалена від початку координат;

F – фокусна відстань досліджуваної лінзи або відстань від лінзи до дзеркала, що обертається;

a – азимутальний кут відхилення дзеркала (серводвигун);

b – радіальний кут відхилення дзеркала (кодувальник).

Після перетворення в декартову систему координат (рис. 3.5) координати X та Y відповідають положенню точки зондування на поверхні лінзи, тоді як координата Z набуває значення модуля вектора зміщення.

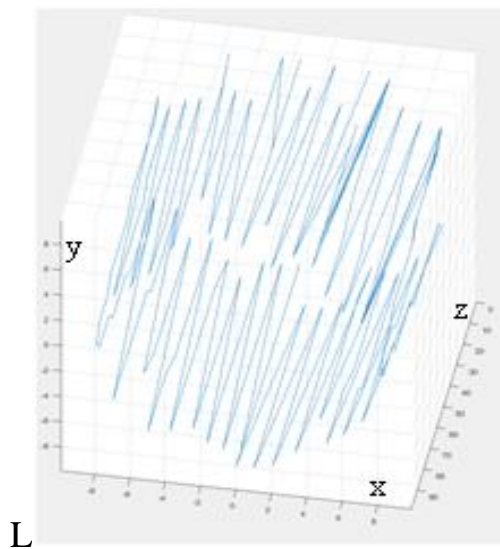


Рисунок 3.5 –Тривимірний графік зміщення центральної точки оптичної потужності лазерного променя на фотоприймачі в залежності від кутів відхилення променя

За результатами кількох повторних запусків моделювання (або повторних вимірювань) встановлено, що отримана картина є відтворюваною, а відмінності між реалізаціями не перевищують похибок вимірювального тракту. Напрямки векторів зміщення енергетичного центру плями демонструють узгоджений тренд, наведений на рис. 3.6.

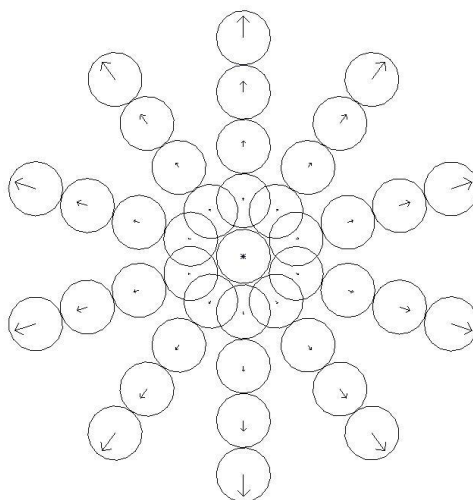


Рисунок 3.6 – Тенденція розташування вектора

Ця тенденція пов'язана з тим, що в якості опорної збиральної лінзи використовується одна лінза. Використання однієї лінзи спричиняє вплив таких явищ, як аберації, на процес вимірювання.

Щоб усунути цей недолік, замість об'єктива можна замінити об'єктив на об'єктив, в якому компенсуються явища аберацій, або цей факт спотворення враховується при проведенні тестів. Нульовою точкою для кожної координати є кінець вектора, отриманого шляхом вимірювання контрольної лінзи, що перевіряється. Надалі в роботі будемо фіксувати відхилення відносно «нульових» точок опорної лінзи; відхилення від цих показників вказуватиме на невідповідність між тестованим об'єктивом і стандартом.

Проведемо такий експеримент: оскільки двох однакових лінз не існує, то вимірювання проведемо на одній із наявних.

Назвемо цю лінзу еталонною лінзою та використаємо пристрій для вимірювання характеристик цієї лінзи. Після обробки даних отримуємо таблицю з координатами нульових точок. Після першого вимірювання нанесемо на поверхню лінзи кілька маленьких крапель води – вони імітують скручування або неякісне полірування і повторимо процес вимірювання без зміни параметрів сканування (рис. 3.7). Щоб імітувати неоднорідність, помістимо краплю рідини на поверхню оптичної частини та проведемо повторні тести. Опрацювавши отримані дані, виявимо, що розподіл центрів сили змінив свій початковий вигляд. Розташування силових центрів для несправної лінзи показано на рис. 3.8.

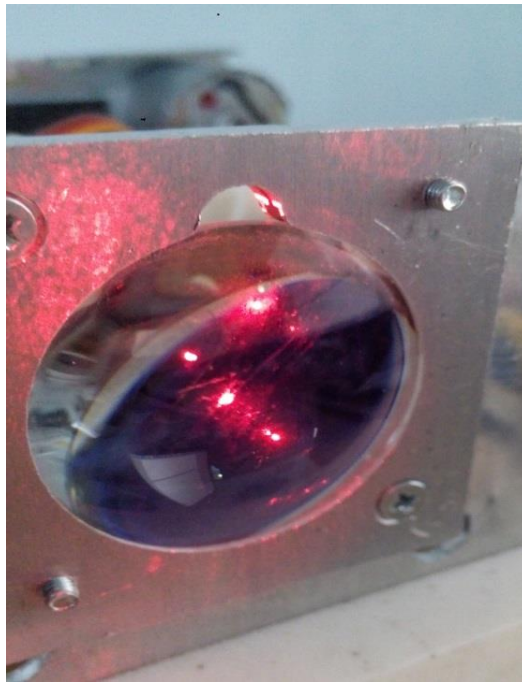


Рисунок 3.7 – Імітація нерівностей ОД і свилей на поверхні лінзи за допомогою підручних засобів

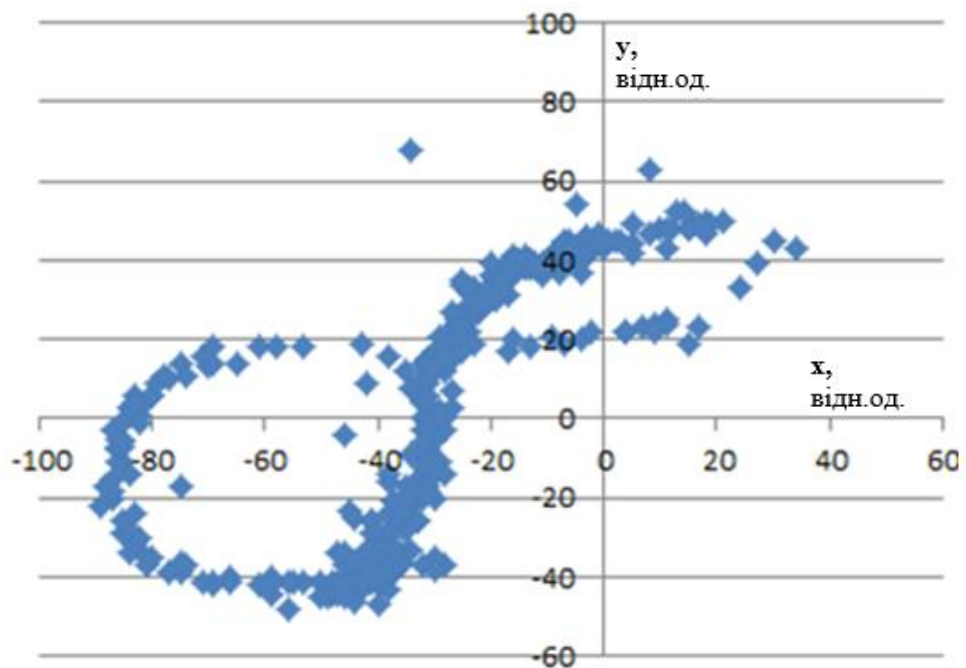


Рисунок 3.8 – Результат вимірювання за наявності краплі на поверхні досліджуваної лінзи

Отримуємо два масиви даних. Перетворивши перший масив вимірювальних даних еталонної лінзи, отримаємо нульові точки центрів інтенсивності для кожного кута відхилення променя (див. рис. 3.2).

Перетворимо другий масив даних і отримаємо точки центру інтенсивності для досліджуваної лінзи (див. рис. 3.8).

Між отриманими візуальними результатами є відмінності, але вони неочевидні. Для зручності сприйняття віднімемо один масив даних від другого і розглянемо тільки параметр відхилення або невідповідності.

Таким чином, уздовж координат і будуть також координати точок у декартовій системі координат, а різниця довжин векторів буде відкладена по осі (рис. 3.9).

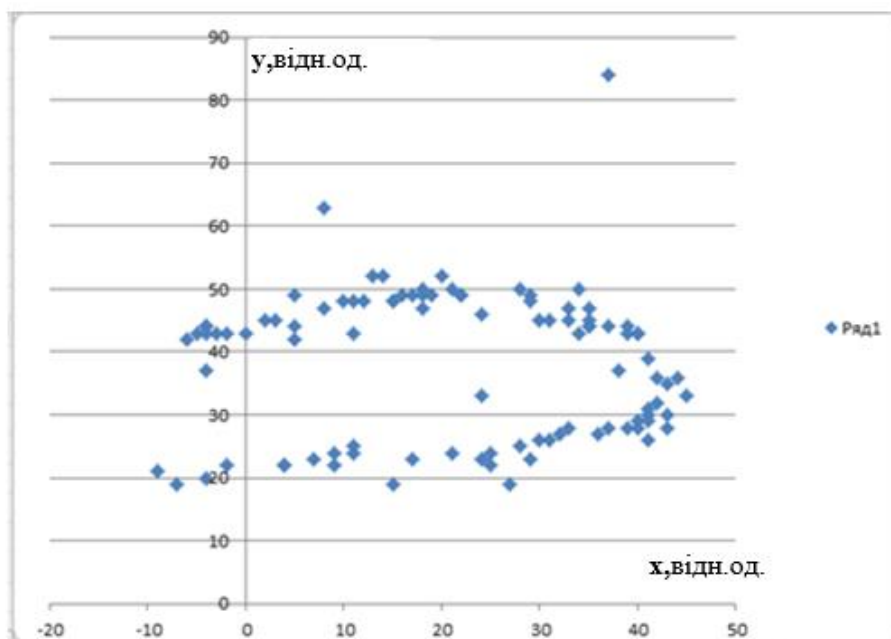


Рисунок 3.9 – Координати точок, для яких зафіксовано розбіжність довжин векторів

Отримані результати свідчать, що запропонований підхід може бути використаний для якісного оцінювання характеристик лінз за змінами

параметрів повернутого лазерного пучка. Метод також потенційно придатний для контролю якості складання оптичних вузлів (за умови відтворюваного юстування), а в окремих випадках — для аналізу прозорих зразків у вигляді плоскопаралельних пластин.

Для практичного застосування необхідно сформувати збалансовану оптичну конфігурацію з елементів із відомими параметрами та ввести до тракту один елемент, характеристики якого підлягають перевірці. Під час сканування зразка в робочій зоні визначають координати енергетичного центру (центра інтенсивності) плями на фотоприймачі та аналізують їх відхилення від опорного (еталонного) режиму. Це дозволяє робити висновки про наявність відхилень у характеристиках зразка або про порушення умов юстування/стабільності системи. Точність і відтворюваність оцінювання визначаються якістю калібрування, стабільністю юстування оптичного тракту, параметрами електронного вимірювального каналу та умовами реєстрації сигналів фотоприймача.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано типові дефекти оптичного скла та поверхні лінз і узагальнено підходи до їх виявлення; розглянуто обмеження класичного методу Гартмана.
2. Обґрунтовано принцип безконтактного оцінювання якості лінз за зміщенням енергетичного центру лазерного пучка, зареєстрованого квадрантним фотоприймачем.
3. Сформовано оптичну конфігурацію пристрою та виконано комп'ютерне моделювання в TracePro для номінального випадку і моделей дефектів (зокрема газові включення, свилі/шліри, помутніння).
4. Розроблено алгоритм обчислення координат енергетичного центру пучка за сигналами чотирьох сегментів фотоприймача на основі векторної інтерпретації внесків секторів, а також визначення сумарної інтенсивності як додаткового діагностичного параметра.
5. Запропоновано підхід до побудови карти відхилень на поверхні лінзи під час сканування: формування масиву даних “кутове положення дзеркала + сигнали 4 сегментів”, розрахунок координат енергетичного центру та перетворення з кутових/радіальних параметрів у координати площини лінзи.
6. Визначено основні фактори, що обмежують точність методу та потребують окремого етапу калібрування: нерівномірність чутливості сегментів, шуми/дрейфи підсилювача та АЦП, стабільність джерела випромінювання, механічні збурення та похибки юстування. Урахування цих факторів є необхідною умовою для подальшої експериментальної верифікації та отримання кількісних метрологічних оцінок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Malacara D. (Ed.). Optical Shop Testing. 3rd ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2007. 862 p.
2. ISO 10110-18:2018. Optics and photonics – Preparation of drawings for optical elements and systems – Part 18: Imperfections and inclusions. Geneva : ISO, 2018.
3. Star Test & Classical Hartmann Test : OPTI 515L Laboratory 3. University of Arizona, 2016. URL: https://wp.optics.arizona.edu/visualopticslab/wp-content/uploads/sites/52/2016/08/OPTI-515L-ab3_2016.pdf. (дата звернення: 01.12.2025).
4. Hecht E. Optics. 5th ed. Boston : Pearson, 2017.
5. Thorlabs. Position Sensing Tutorial : tutorial materials. URL: <https://www.thorlabs.com/tutorials.cfm/> (дата звернення: 10.12.2025).
6. SCHOTT. Bubbles and Inclusions in Optical Glass (TIE-28). Version May 2016. URL: <https://www.schott.com/shop/medias/schott-tie-28-bubbles-and-inclusions-in-optical-glass-eng.pdf/> (дата звернення: 01.12.2025).
7. Lambda Research Corporation (Altair). TracePro (Optical System Modeling & Ray Tracing Software). URL: <https://www.lambdaresearch.com/tracepro/> (дата звернення: 01.12.2025).
8. Hnatenko O. S., Machekhin Yu. P. Generation mode stability of a fiber ring laser. Telecommunications and Radio Engineering. 2015. Vol. 74, No. 7. P. 641–647.
9. Hnatenko O. S., Machekhin Yu. P., Kurskoy Yu. S., Obozna V. P., Vasianovych A. V. Ring fiber lasers for telecommunication systems. Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, No. 6. P. 541–548.
10. Thorlabs. Quadrant Position-Sensing Detectors. Catalog Pages (V21). URL: <https://www.thorlabs.com/catalogpages/v21/431.pdf> (дата звернення: 01.12.2025).

