

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ, АВТОТРАНСПОРТУ ТА
МАШИНОБУДУВАННЯ

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ РОБОТІВ

ПРАКТИКУМ

для здобувачів освітнього ступеня «магістр»
зі спеціальностей галузі знань G7 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
усіх форм навчання

Черкаси
2025

УДК 681.78:007.52] (076)
О-62

*Затверджено вченою радою ФЕТАМ,
протокол № 6 від 30.09.2025 р.,
згідно з рішенням кафедри
приладобудування, мехатроніки та
комп'ютеризованих технологій,
протокол № 2 від 25.08.2025 р.*

Упорядники: Трембовецька Р.В., д.т.н., професор,
Гальченко В.Я., д.т.н., професор,
Тичков В.В., к.т.н., доцент

Рецензент Гордієнко В.І., д.т.н., професор

О-62 Оптико-електронні пристрої роботів: практикум для здобувачів освітнього ступеня «магістр» зі спеціальностей галузі знань G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка усіх форм навчання [Електронний ресурс] / [Упоряд.: Р.В. Трембовецька, В.Я. Гальченко, В.В. Тичков]; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2025. – 276 с. – Назва з титульного екрана.

Видання поглиблює знання здобувачів освітнього ступеня «магістр» галузі знань G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка з проектування та метрологічного забезпечення оптичних та оптико-електронних пристрої роботів. Запропоновано послідовність та приклади розв'язку практичних завдань з використанням пакету прикладних програм MathCAD.

УДК 681.78:007.52] (076)

Навчальне електронне видання
комбінованого використання

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ РОБОТІВ

ПРАКТИКУМ

для здобувачів освітнього ступеня «магістр»
зі спеціальностей галузі знань G7 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
усіх форм навчання

Упорядники:
Трембовецька Руслана Володимирівна,
Гальченко Володимир Якович, **Тичков** Володимир Володимирович

В авторській редакції

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	10
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1.	
ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ОЕП	
Практичне заняття №1 Визначення кардинальних точок оптичної системи	11
Практичне заняття №2 Графічна побудова зображень лінзами	33
Практичне заняття №3 Визначення параксіальних параметрів лінз різних типів	49
Практичне заняття №4 Оптична схема для фокусування лазерного випромінювання	75
Практичне заняття №5 Фотоелектрична оптична система з лазером	106
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2.	
КОМПОНЕНТИ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ	
Практичне заняття №6 Фотоприймальні пристрої	122
Практичне заняття №7 Розрахунок потоків і опроміненості на вході ОЕП	146
Практичне заняття №8 Волоконна оптика та світлопроводи	161
Практичне заняття №9 Енергетичний розрахунок двокомпонентної фотоелектричної оптичної системи	177
Практичне заняття №10 Точнісний розрахунок ОЕП	201

ДОДАТКИ

Додаток А Зразок оформлення титульної сторінки	229
Додаток Б Світловипромінювальні та фотоприймальні елементи	230
Таблиця Б1 - Фотометричні та електричні параметри світловипромінювальних діодів із спрямованим випромінюванням	
Таблиця Б2 - Світловипромінювальні діоди з розсіяним випромінюванням	
Таблиця Б3 - Параметри арсенід галієвих світловипромінювальних діодів інфрачервоного спектру	
Таблиця Б4 - Фотодіоди та фотоприймальні модулі	
Таблиця Б5 - Основні параметри кремнієвих фотодіодів	
Таблиця Б6 - Основні параметри фоторезисторів	
Таблиця Б7 - Основні світлові та електричні параметри і розміри ламп розжарювання для оптичних приладів	
Додаток Б8 - Технічні характеристики операційних підсилювачів	
Додаток В Технічні характеристики деяких моделей технологічних твердотільних лазерів	246
Таблиця В1 - Напівпровідникові інжекційні багатомодові лазери імпульсного режиму роботи	
Таблиця В2 - Напівпровідникові інжекційні багатомодові лазери неперервного режиму роботи	
Таблиця В3 - Неодимові твердотільні лазери з діодною накачкою (DPSS)	
Таблиця В4 - Імпульсний переналагоджуваний титан-сапфіровий лазер модель CF125	
Таблиця В5 - Серія лазерів ВЛМ та ВЛІ	
ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ	270

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

A

AB - розмір предмету

A і A' - спряжені точки

AA' - оптична ось деякої центрованої системи

a_i - апертура дзеркала (поперечні розміри утворених поверхонь дзеркал)

C

C - критерій добротності об'єктиву

D

D, D' - діаметри вхідної і вихідної зіниці системи відповідно

d - товщина лінзи вздовж оптичної осі

d - відстань між головними площинами конденсора і об'єктиву

$d_1, d_2, \dots, d_m, \dots, d_{k-1}$, де d_m - відстань між задньою головною площиною попереднього m -го компонента та передньої головної площини наступного

F

F - передній головний фокус

F' - задній фокус системи

f' - задня фокусна відстань

f - передня фокусна відстань

$f'_{об}$ - фокусна відстань об'єктива телескопічної системи

f, f_0 - дійсна і номінальна (характеристики) перетворення, що пов'язують x та y

$f(x, q_1, q_2, \dots, q_n, q'_1, q'_2, q'_l)$ - теоретична інструментальна похибка (можна віднести до методичної похибки)

G

g_1, g_2 - параметр резонатора

H

H - передня головна площина

H' - задня головна площина

H_0 - основа закону розподілу Δ_0

I

i_{\min} - мінімально допустимий струм фотоприймача

K

k - діафрагментне число

L

L - яскравість

L - відстань між відбивальними поверхнями дзеркал

L - довжина активного середовища

M

M - матриця перетворення оптичної системи

$\tilde{M}(\Delta_s)$ - оцінка математичного очікування систематичної складової похибки приладу

N

n, n' - показник заломлення

R

R_i - радіус кривизни дзеркал

$R(z)$ - радіус хвильового фронту гаусового пучка

R_e - параметр конфокальності гаусового пучка

R_e' - перетворений конфокальний параметр резонатора

R' - радіус перетвореного хвильового фронту

$r_{\Delta}^{\circ}(\tau)$ - нормалізована автокореляційна функція

S

S - площа випромінювальної поверхні

S_I - інтегральна спектральна чутливість

S_p - відстань від першої поверхні до вхідної зіниці

$S_{p'}$ - відстань від останньої поверхні до вихідної зіниці

S_{λ} - спектральна чутливість

$S_{F'}, S_F$ - задній та передній фокальний відрізок

$S_{H'}, S_H$ - положення головних площин відносно вершин сферичних поверхонь

$S_{\Delta}^{\circ}(\omega)$ - спектральна щільність випадкової складової похибки

T

T - температура тіла випромінювання

TEM - хвиля (Transversal Electromagnetic Mode - поперечна електромагнітна мода)

Q

Q - скважність

$q \approx 10^6$ - індекс повздовжніх коливань

Q - добротність резонатора

$q_1, q_2, \dots, q_n, q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}$ - дійсне і номінальне значення конструктивних параметрів приладу або його вузлів та деталей

$q'_1, q'_2, q'_l, q'_{10}, q'_{20}, q'_{l0}$ - дійсне і номінальне значення впливових факторів

W

W_0 - перетяжка лазерного пучка

$W(z)$ - ширина лазерного пучка на будь-якій відстані Z

W_1, W_2 - радіуси гаусового пучка на дзеркалах резонатора

$2 \cdot W'_0$ - діаметр перетяжки перетвореного пучка

X

x, x_0 - дійсне і номінальне значення для інформативного параметра вхідного сигналу

Y

y, y_0 - дійсне і номінальне значення інформативного параметра вихідного сигналу відповідно

Z

Z_0 - радіус дифракційного розходження

z_1, z_2 - положення перетяжки гаусового пучка відносно вершин дзеркал резонатора

Φ - оптична сила системи

Γ_T - видиме збільшення (відношення тангенсів кутів, під яким око бачить зображення крізь оптичну систему та предмет без неї)

α - повздовжнє збільшення оптичної системи

β - лінійне збільшення оптичної системи

β_n - лінійне кутове збільшення в перетяжках

β_{p1} - лінійне збільшення в зіниці об'єктиву

γ - кутове збільшення оптичної системи

γ_n - кутове збільшення в перетяжках

δ_d - мінімальний лінійний розмір об'єкту, який можна бути бачити за допомогою світлового мікроскопа

Δ_{0s} - систематична похибка

$\overset{\circ}{\Delta}_0$ - випадкова похибка

$\overset{\circ}{\Delta}_{0q}$ - випадкова похибка квантування

Δ_0 - основна похибка

Δ_i - інструментальна складова похибки

$\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$ - випадкова складова основної похибки, зумовлена гістерезисом

$\sum_{i=1}^l \Delta_{ci}$ - поєднання додаткових похибок, зумовлених дією зовнішніх впливових величин і неінформативних параметрів вхідного сигналу

Δ_{dyn} - динамічна похибка

Δ_{int} - складова похибки, зумовлена взаємодією приладу з об'єктом вимірювання або контролю

Δ_{0sp} - границя допустимої систематичної складової основної похибки

Δ_{sH} - статична оцінка систематичної складової Δ_s похибки конкретного екземпляра ОЕП

Δy_{Σ} - загальна (повна) похибка приладу

$\Delta x = x - x_0$ - відхилення інформативного параметра від номінального значення

$\Delta q_i = q_i - q_{i0}$ - первинна інструментальна похибка i -го конструктивного параметра

$\Delta q'_k = \Delta q'_k - \Delta q'_{k0}$ - зміна k -го впливового фактора

σ - кут до оптичної осі

$\sigma \left[\overset{\circ}{\Delta} \right]$ - середнє квадратичне відхилення випадкової складової похибки

$\sigma_{\Sigma}^2, \sigma_m^2, \sigma_i^2, \sigma_{dyn}^2, \sigma_{ш}^2$ - дисперсії випадкових складових загальної (сумарної) похибки і її складових: методичної, інструментальної, динамічної та шумової
 ω - кут відхилення

2ω - кутове поле в просторі предметів об'єктива

$2\omega'$ - кутове поле в просторі зображення окуляра

$2\omega'_k$ - Кутове поле конденсора в просторі зображення

$\Delta_{HH'}$ - відстань між головними площинами (головними точками)

$\Delta_{\Sigma^{дов.}}$ - довірчий інтервал сумарної похибки

λ_{max} - довжина хвилі; максимум спектрального розподілу

Φ_d - дифракційна дозвільна здатність

τ_i - тривалість імпульсу

ν - частота випромінювання

ВСТУП

Сучасні оптико-електронні пристрої відіграють суттєву роль і слугують невіддільною частиною науково-технічного прогресу.

Спеціалісти, які здатні забезпечити створення та удосконалення оптичних електронних пристроїв і систем, повинні мати основні уявлення та прикладні знання в дисципліні «Проектування оптико-електронних пристроїв роботів».

Практикум побудований відповідно до кредитно-модульної системи організації навчального процесу, а саме, матеріал згруповано у два змістові модулі «Оптичні системи ОЕП», «Компоненти оптоелектроніки».

Змістові модулі містять по 5 практичних робіт які спрямовані на напрацювання практичних навичок розрахунку елементів оптичних та оптико-електронних систем.

На практичних заняттях детально розглядаються окремі теоретичні положення навчальної дисципліни «Проектування оптико-електронних пристроїв роботів» та формуються у студентів вміння та навички їх практичного застосування шляхом індивідуального виконання завдань.

Кожне практичне заняття містить:

- проведення попереднього контролю знань за питаннями, що наводяться до кожної роботи;
- розв'язування завдань з їх обговоренням та встановленням незрозумілих, складних моментів;
- розв'язування індивідуальних завдань, їх перевірку;
- оцінювання кінцевого рівня знань за питаннями, що пропонуються до кожної роботи.

Змістовий модуль «Оптичні системи ОЕП» містить 5 практичних занять які спрямовані на напрацювання практичних навичок розрахунку: кардинальних елементів оптичної системи; параксіальних параметрів лінзових елементів; параметрів гаусових пучків, оптичної системи для формування та фокусування лазерного випромінювання; двокомпонентної випромінювальної насадки для лазерної системи, яка формує паралельний пучок світла та енергетичний розрахунок створеної оптичної системи.

Змістовий модуль «Оптичні системи ОЕП» містить 5 практичних занять які спрямовані на напрацювання практичних навичок розрахунку: щодо узгодження приймача випромінювання з оптичною схемою та електронним трактом; опроміненості та потоків на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при різних типах опромінювачів; розрахунку волоконно-оптичного датчика тиску із відбивною діафрагмою; ознайомитися з методикою розрахунку точності ОЕП.

Практикум розрахований для студентів галузі знань G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, які опановують навчальні компоненти освітньої програми «Робототехнічні системи та автоматизація».

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ОЕП

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1 ВИЗНАЧЕННЯ КАРДИНАЛЬНИХ ТОЧОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи

1. Ознайомитися з основними положеннями геометричної оптики.
2. Визначити кардинальні точки оптичної системи.
3. Побудувати зображення предмету.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Закони геометричної оптики.
2. Коефіцієнт заломлення.

2. Теоретичні відомості

2.1 Кардинальні елементи [1, 3]

Будь-яку центровану систему, в тому числі і лінзу, можна задати так званими *кардинальними точками*:

- головним фокусами F, F' ;
- головними точками H, H' ;
- вузловими точками, які в найпростіших випадках збігаються з головними рис.1.1.

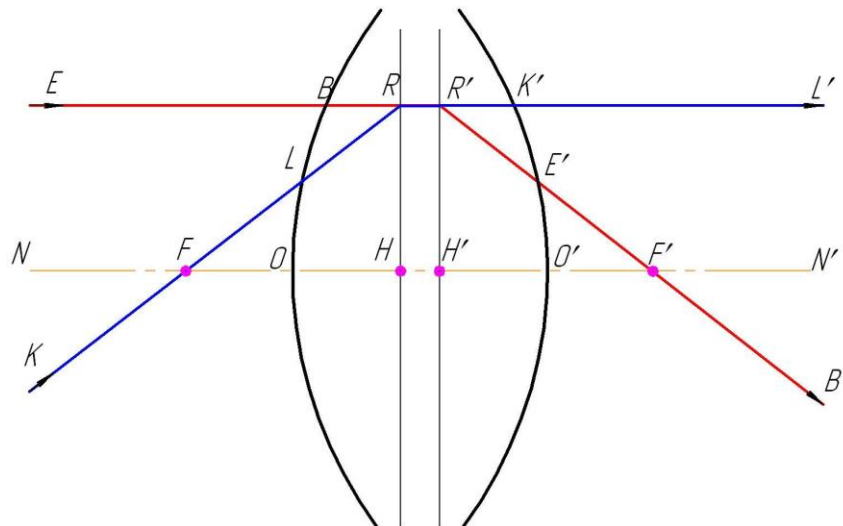


Рисунок 1.1 - Кардинальні точки оптичної системи

Таке уявлення є наближеним і можливо лише для ідеальної системи, тобто для системи в якій зберігається гомоцентричність пучків променів і зображення геометрично подібне предмету. На рис.1.1 NN' - головна оптична ось, відносно якої центрується системи. Якщо через систему пропустити пучок

променів, паралельний до головної оптичної осі (промінь EB), то, відповідно до властивості ідеальної оптичної системи, після заломлення (промінь $E'B'$) вони пройдуть через головний фокус F' . Тому, промінь $E'B'$ буде спряженим, щодо EB , що виходить із системи.

Передній головний фокус F характеризується тим, що пучок променів, який входить в систему через точку F , вийде із системи у вигляді пучка паралельного до оптичної осі. Тому, якщо промінь KL проходить через точку F , то спряжений до нього промінь $K'L'$ виходить із системи паралельно до головної оптичної осі рис.1.1.

Площини, проведені перпендикулярно головній оптичній осі через точки F та F' називаються **фокальними площинами системи**.

Дві спряжені площини, що розташовані перпендикулярно до оптичної осі, для яких лінійне збільшення ± 1 , називають **головними площинами**. Розрізняють передню і задню головні площини рис.1.1.

Задня головна площина H' визначається перетином променів, що проходять паралельно осі в просторі предметів з їх продовженням після заломлення через систему.

Передня головна площина H визначається аналогічно як задня, якщо провести паралельно осі промінь в зворотному напрямку (зі сторони простору зображення).

Точки перетину головних площин з оптичною віссю є **головними точками системи**.

Заднім фокусом системи є точка F' . Точка F' на оптичній осі в просторі зображення, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі предметів, називається **заднім фокусом оптичної системи**.

Площина, яка проходить через задній фокус і перпендикулярна до оптичної осі, називається **задньою фокальною площиною** оптичної системи. Ця площина є зображенням нескінченно віддаленої площини.

Переднім фокусом системи є точка F . Точка F на оптичній осі в просторі предметів, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі зображення, називається **переднім фокусом оптичної системи**. Площину, перпендикулярну до оптичної осі, яка проходить через передній фокус, називають **передньою фокальною площиною**.

Задня фокусна відстань – відстань від задньої головної площини до заднього фокуса F' ($H'F' = f'$).

Передня фокусна відстань – відстань від передньої головної площини до переднього фокуса ($HF = -f$).

Фокуси, фокальні площини, головні площини, головні точки та фокусні відстані називають **кардинальними елементами оптичної системи**.

2.2 Залежності між положенням, розмірами предмету та зображення

Визначення кардинальних елементів дозволяє визначити положення та розмір зображення графічним методом. Для цього необхідно побудувати хід двох променів, що виходять із однієї позаосьової точки B предмету AB рис.1.2.

Із побудови $H'M'_1 = AB = y$, $HM_2 = A'B' = -y'$, і подібності трикутників ABF та FHM_2 визначаємо [1, 3, 6]:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-z} \Rightarrow \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} \quad (1.1)$$

Аналогічно для другої пари подібних трикутників $H'M'_1F'$ і $F'A'B'$ маємо:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{f'}{z'} \Rightarrow \frac{y'}{y} = -\frac{f'}{z'} \quad (1.2)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (1.2) та (1.1) при $-f = f'$, отримаємо **формулу Ньютона** [1, 3, 6]:

$$\begin{aligned} z \cdot z' &= f \cdot f' \\ z \cdot z' &= f'^2 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Із формули (1.1) (1.2) отримаємо формулу лінійного збільшення оптичної системи [1, 3]:

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{f'}{z'} \quad (1.4)$$

Положення спряжених точок A і A' можна також визначити відносно головних площин, тобто відрізками HA і $H'A'$. Початок цих відрізків лежить в точках H і H' . Використаємо позначення: $HA = -a$; $H'A' = a'$. Із рис.1.3 з урахуванням знаків визначаємо [1, 3]:

$$\begin{aligned} z &= a - f; \\ z' &= a' - f' \end{aligned} \quad (1.5)$$

Підставивши значення (1.5) в формулу Ньютона, після спрощення отримаємо $f' \cdot a + f \cdot a' = a \cdot a'$. Розділивши обидві частини на aa' , отримаємо **формулу Гауса, або формулу відрізків** [1, 3]:

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1 \quad (1.6)$$

Якщо $-f = f'$, то формула (1.6) прийме вигляд [1, 3]:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (1.7)$$

Лінійне збільшення системи можна виразити через відрізки a і a' . Із виразу (1.6) маємо:

$$\frac{a'}{a} = \frac{f' + z'}{f + z} \quad (1.8)$$

Підставляємо значення z' із формули (1.5) в вираз (1.8):

$$\frac{a'}{a} = \frac{f' \cdot z + f \cdot f'}{f \cdot (f + z)} = \frac{f'(z + f)}{z(z + f)} = \frac{f'}{z} \quad (1.9)$$

Із формули Ньютона як наслідок маємо:

$$\frac{a'}{a} = \frac{f'}{z} = \frac{z'}{f} \quad (1.10)$$

Співвідношення (1.10) дозволяє отримати вираз для лінійного збільшення через відрізки a і a' [1, 3]:

$$\beta = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{a'}{a} \quad (1.11)$$

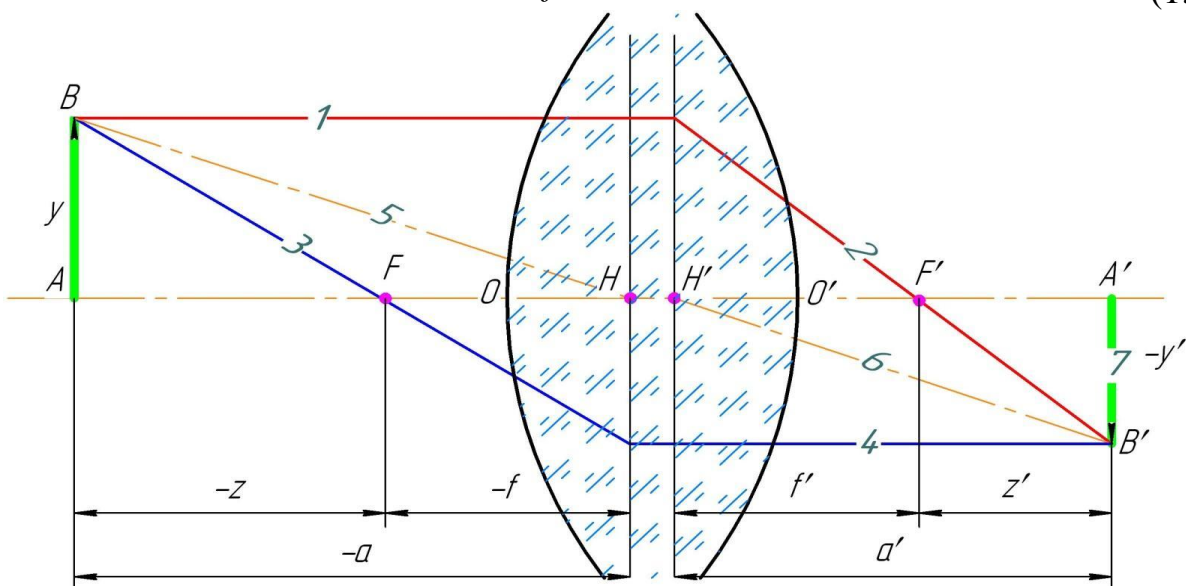


Рисунок 1.2 - Лінійне збільшення оптичної системи

Кутовим збільшенням оптичної системи називається відношення тангенсів кутів, утворених спряженими променями з оптичною віссю рис.1.3 [1, 3]:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg}(\sigma')}{\operatorname{tg}(\sigma)} \quad (1.12)$$

Із рис.1.3 маємо:

$$\operatorname{tg}(\sigma) = \frac{h}{a}; \operatorname{tg}(\sigma') = \frac{h}{a'} \quad (1.13)$$

Підставляємо значення (1.13) в формулу (1.12), отримуємо: $\gamma = \frac{a}{a'}$. Беручи до уваги (1.12), знаходимо:

$$\gamma = \frac{a}{a'} = \frac{z}{f'} = \frac{f}{z'} \quad (1.14)$$

Використовуючи співвідношення (1.14) і (1.11), отримуємо залежність між кутовим і лінійним збільшенням:

$$\gamma = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{1}{\beta} \quad \text{або} \quad \gamma \cdot \beta = \frac{-f}{f'} \quad (1.15)$$

В окремому випадку, коли $-f = f'$, формула (1.15) має вигляд $\gamma \cdot \beta = 1$. Формула (1.15) дозволяє визначити кутове збільшення в головних площинах. Оскільки лінійне збільшення в головних площинах $\beta_H = +1$, то $\gamma_H = -\frac{f}{f'}$, це

означає, що промінь, який йде із точки B в точку H під кутом α_H , після заломлення повинен пройти через головну точку H' і вийти із системи під кутом α'_H , який не рівний куту α_H , оскільки $\operatorname{tg}(\alpha'_H) = -\frac{f}{f'} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_H)$.

Тільки у випадку $-f = f'$, кути α'_H і α_H будуть рівні.

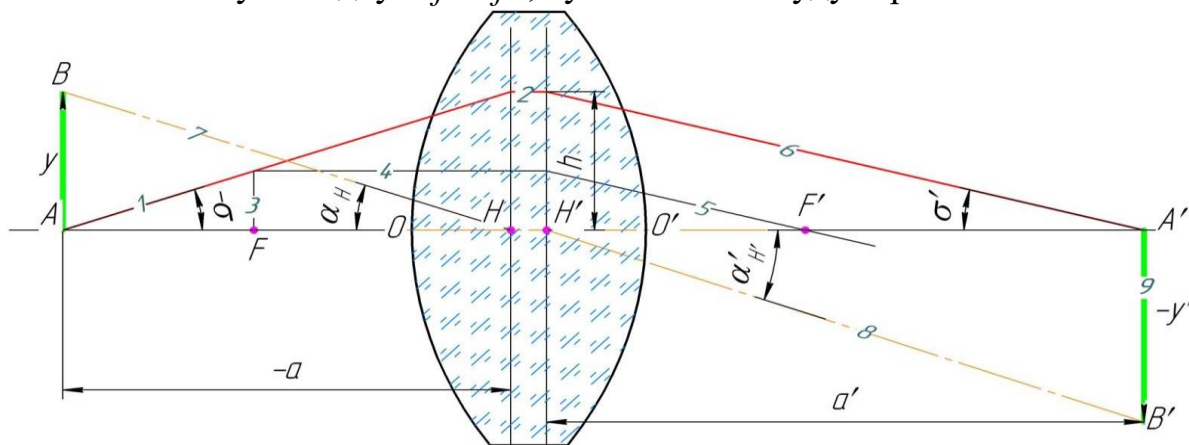


Рисунок 1.3 - Кутове збільшення оптичної системи

Повздовжнє збільшення оптичної системи це відношення відрізків $\Delta z'$ і Δz рис.1.5 [1, 3]:

$$\alpha = \frac{\Delta z'}{\Delta z} \quad (1.16)$$

де $\Delta z = A_1 A_2 = z_2 - z_1$; $\Delta z' = A'_1 A'_2 = z'_2 - z'_1$.

Використовуючи формулу Ньютона, виражаємо відрізки z'_1 і z'_2 через відрізки z_1 і z_2 і фокусні відстані:

$$z'_1 = \frac{f \cdot f'}{z_1}; \quad z'_2 = \frac{f \cdot f'}{z_2} \quad (1.17)$$

Тоді

$$\Delta z' = z'_2 - z'_1 = f \cdot f' \cdot \left(\frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1} \right) = \frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1} \cdot (z_1 - z_2) \quad (1.18)$$

Підставляємо отриманий вираз в формулу (1.16) отримаємо:

$$\alpha = \frac{\Delta z'}{\Delta z} = \frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1 \cdot (z_2 - z_1)} \cdot (z_1 - z_2) = -\frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1} \quad (1.19)$$

Помножимо чисельник і знаменник отриманого виразу на фокусну відстань, в результаті отримаємо:

$$\alpha = -\frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1} \cdot \frac{f}{f} \quad (1.20)$$

Але відношення $\frac{f}{z_1}$ і $\frac{f}{z_2}$ являють собою лінійне збільшення в площинах зображення обох пар спряжених площин, які проходять через спряжені точки і перпендикулярні до оптичної осі. Тоді

$$\alpha = -\frac{f'}{f} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \quad (1.21)$$

Нехай точка A_2 наближається до точки A_1 , тобто $z_2 \rightarrow z_1$, тобто точка A'_2 буде наближатися до точки A'_1 і $z'_2 \rightarrow z'_1$. В цьому випадку збільшення β_2 буде

прагнути до β_1 і в граничному випадку $\beta_2 = \beta_1$. Тоді формула (1.21) буде мати вигляд:

$$\alpha = -\frac{f'}{f} \cdot \beta^2 \quad (1.23)$$

Якщо $-f = f'$, то $\alpha = \beta^2$. Із формули (1.15) і (1.23) визначаємо [1, 3]:

$$\alpha = \frac{\beta}{\gamma} \quad (1.24)$$

Формула (1.24) зв'язує збільшення оптичної системи всіх трьох видів.

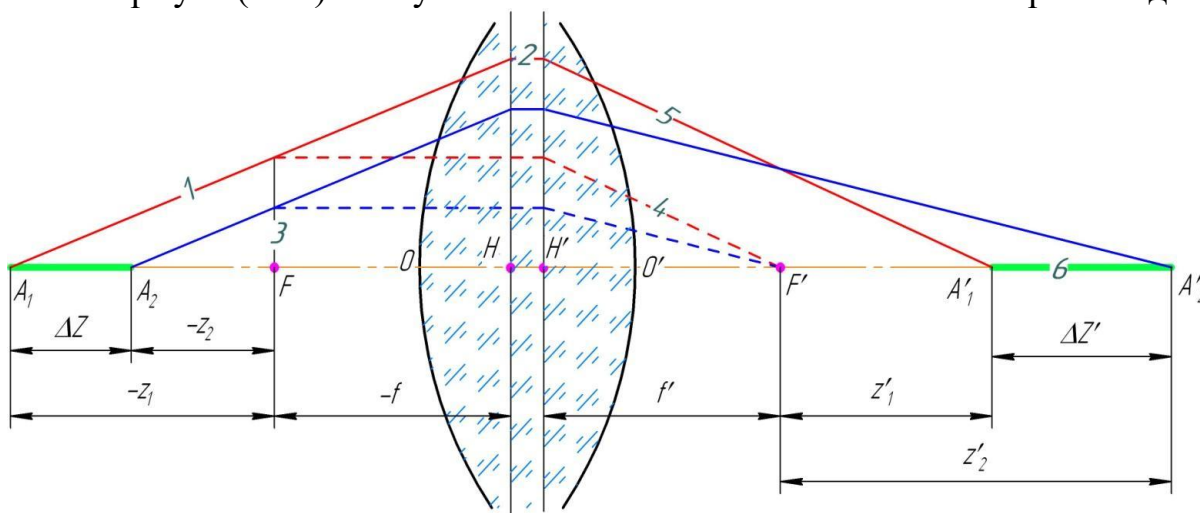


Рисунок 1.4 - Повздовжнє збільшення оптичної системи

2.3 Побудова та розрахунок ходу променю крізь ідеальну оптичну систему

В практичній роботі при проектуванні оптичних приладів досить часто доводиться використовувати властивості кардинальних елементів та основні математичні співвідношення ідеальної оптичної системи. Чотири способи побудови ходу променю крізь позитивну на від'ємну оптичну систему показано на рис.1.5.

промінь 1	НН'	промінь 2
рисунок а		
промінь, що входить в оптичну систему паралельно до оптичної осі	Проходить до задньої головної площини і паралельно до оптичної осі	виходить із оптичної системи через задній фокус F'
промінь, що входить в оптичну систему через головну точку H під деяким кутом α_H	і	виходить із оптичної системи із головної точки H' під кутом $\alpha'_{H'} = \alpha_H$
всі інші промені	и	паралельно до попередніх
пучок променів, що виходить із переднього фокуса F	паралельно до оптичної осі	виходить із оптичної системи пучком променів паралельних до оптичної осі

рисунок в		
промінь, що входить в оптичну систему і проходить через передній фокус F	Проходять до задньої головної площини і паралельно до оптичної осі	виходить із оптичної системи паралельно до оптичної осі (точка перетину із задньою фокальною площиною B')
промінь, що входить в оптичну систему через головну точку H під деяким кутом α_H		виходить із оптичної системи із головної точки H' під кутом $\alpha'_{H'} = \alpha_H$ (точка перетину із задньою фокальною площиною B')
всі інші промені – паралельні до попередніх		збігаються до точки B'
пучок променів, що входить в оптичну систему паралельно до оптичної осі		виходить із оптичної системи через задній фокус F'

промінь 1	2	промінь 3	промінь 4	промінь продовження
рисунок б	Проходять до задньої головної площини і паралельно до оптичної осі	рисунок б		
промінь, що входить в оптичну систему паралельно до оптичної осі		від задньої площини H' проходить через задній фокус F'	виходить із оптичної системи від площини H' як продовження променя 3	продовження променів збираються в передній фокальній площині - точка B
промінь, що входить в оптичну систему через головну точку H під деяким кутом α_H		-	виходить із оптичної системи із головної точки H' під кутом $\alpha'_{H'} = \alpha_H$	
всі інші промені		-	паралельно до попередніх	
рисунок г	рисунок г			
промінь, що входить в оптичну систему і проходить через передній фокус F	Паралельно до оптичної осі	від передньої площини H проходить через передній фокус F	виходить із оптичної системи паралельно до оптичної осі	продовження променів збираються в задній фокальній площині – точка B'
промінь, що входить в оптичну систему через головну точку H під деяким кутом α_H		-	виходить із оптичної системи із головної точки H' під кутом $\alpha'_{H'} = \alpha_H$	
всі інші промені – паралельні до попередніх		-	виходить із оптичної системи від площини H' як продовження свого променя	

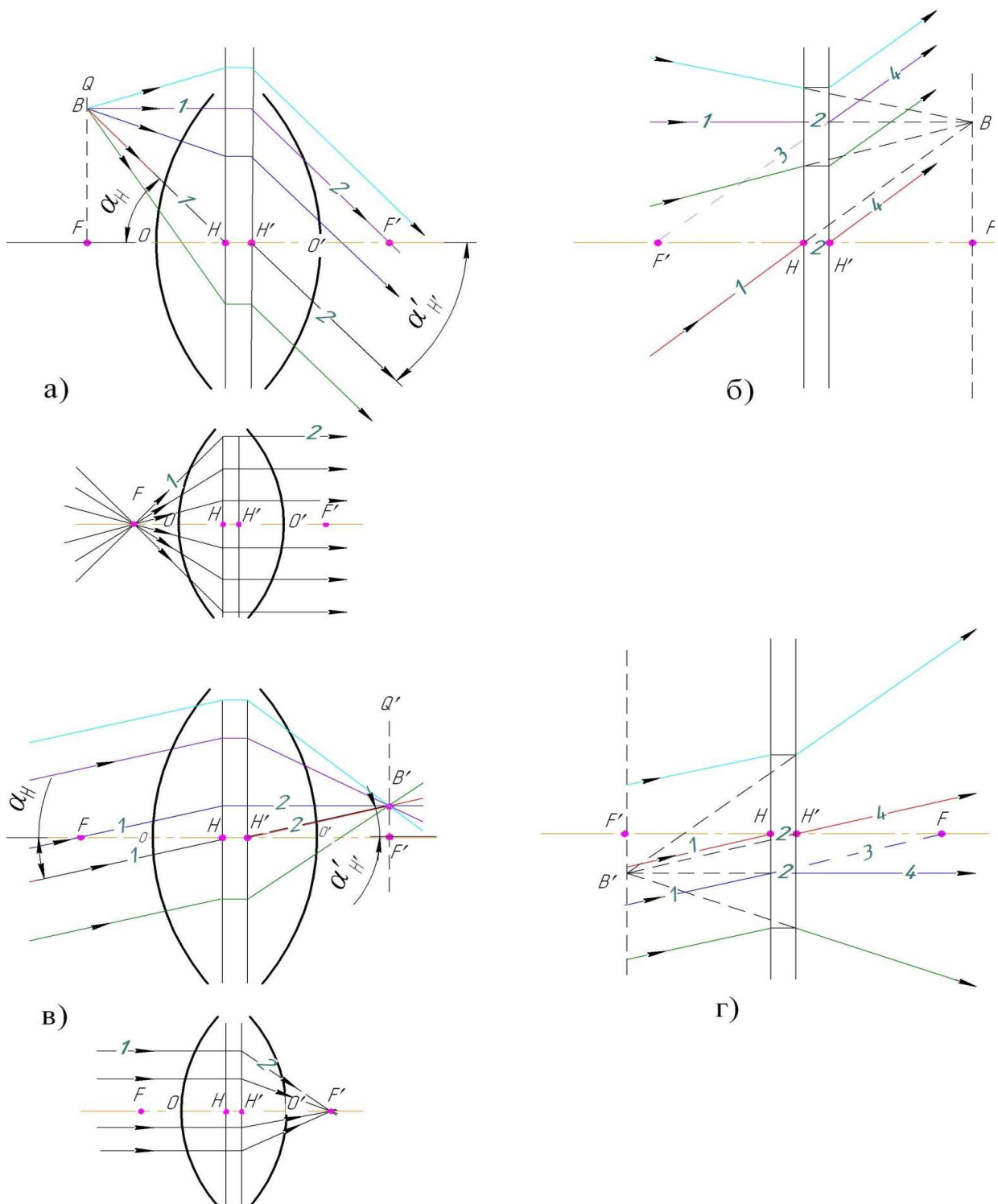


Рисунок 1.5 - Властивість фокальних площин:

- а) позитивна оптична система: промені виходять із точки B фокальної площини або фокусу F ;
- б) від'ємна оптична система: промені виходять із уявної точки B фокальної площини;
- в) позитивна оптична система: промені падають паралельним пучком під деяким кутом до оптичної осі або паралельно до оптичної осі
- г) від'ємна оптична система: промені падають паралельним пучком під деяким кутом до оптичної осі.

3. Виконання роботи

Завдання 1. Властивість фокальних площин

Виконати моделювання оптичної системи зображеної на рис.1.5.

Результат моделювання представити у наступному вигляді.

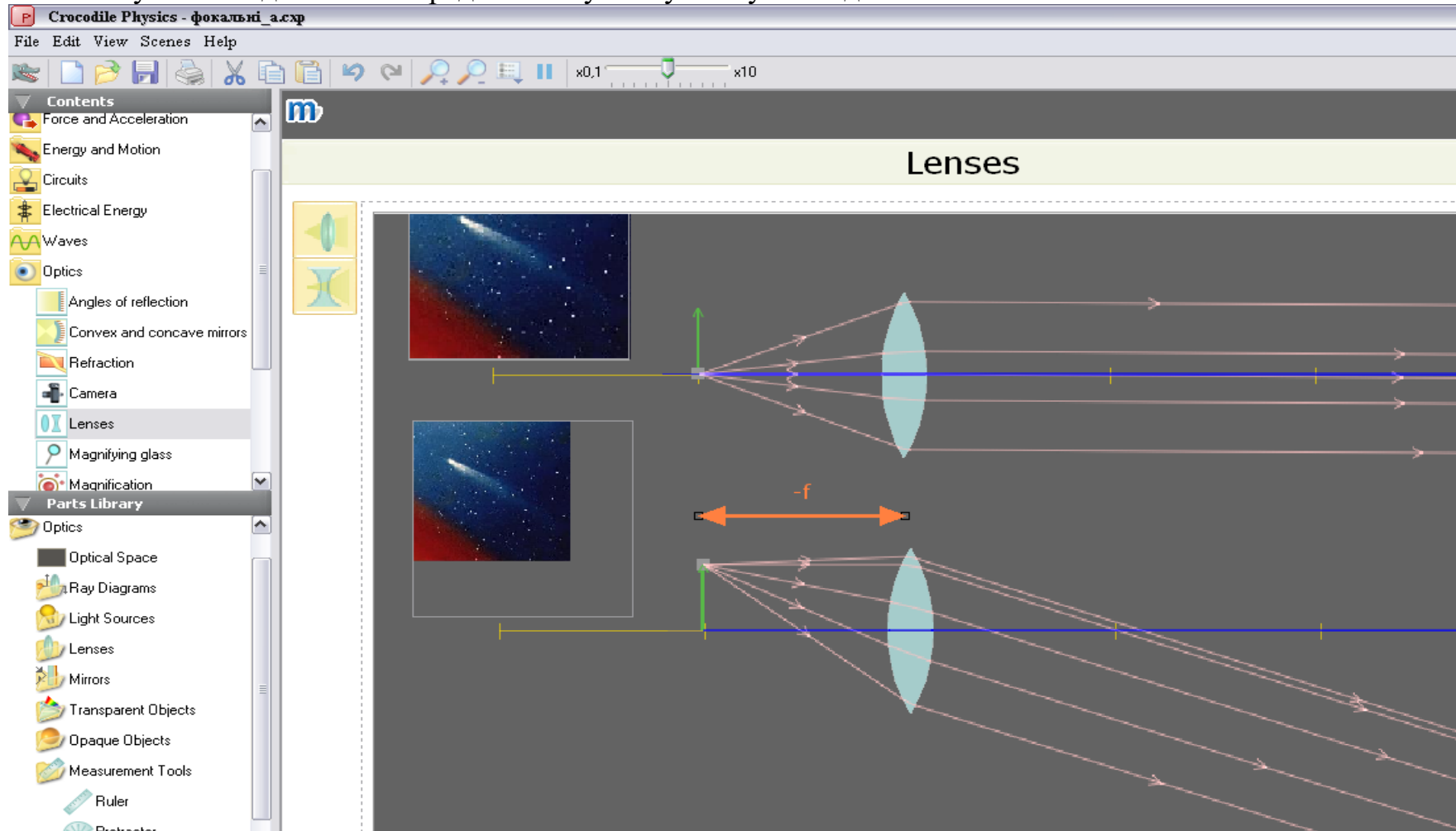


Рисунок 1.6 - Приклад виконання комп'ютерного моделювання оптичної системи рис.1.5 а

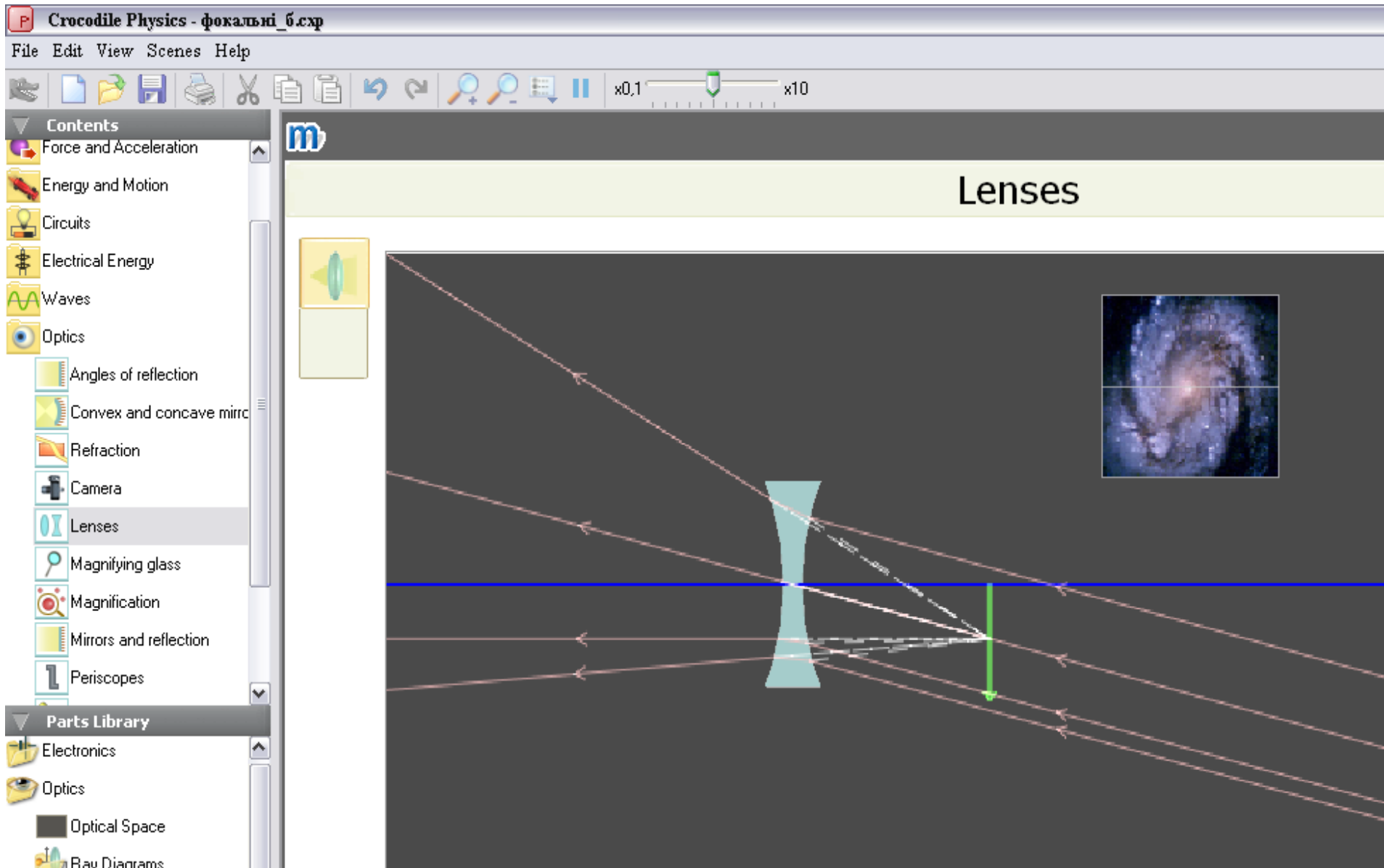


Рисунок 1.7 - Приклад виконання комп'ютерного моделювання оптичної системи рис.1.5 б

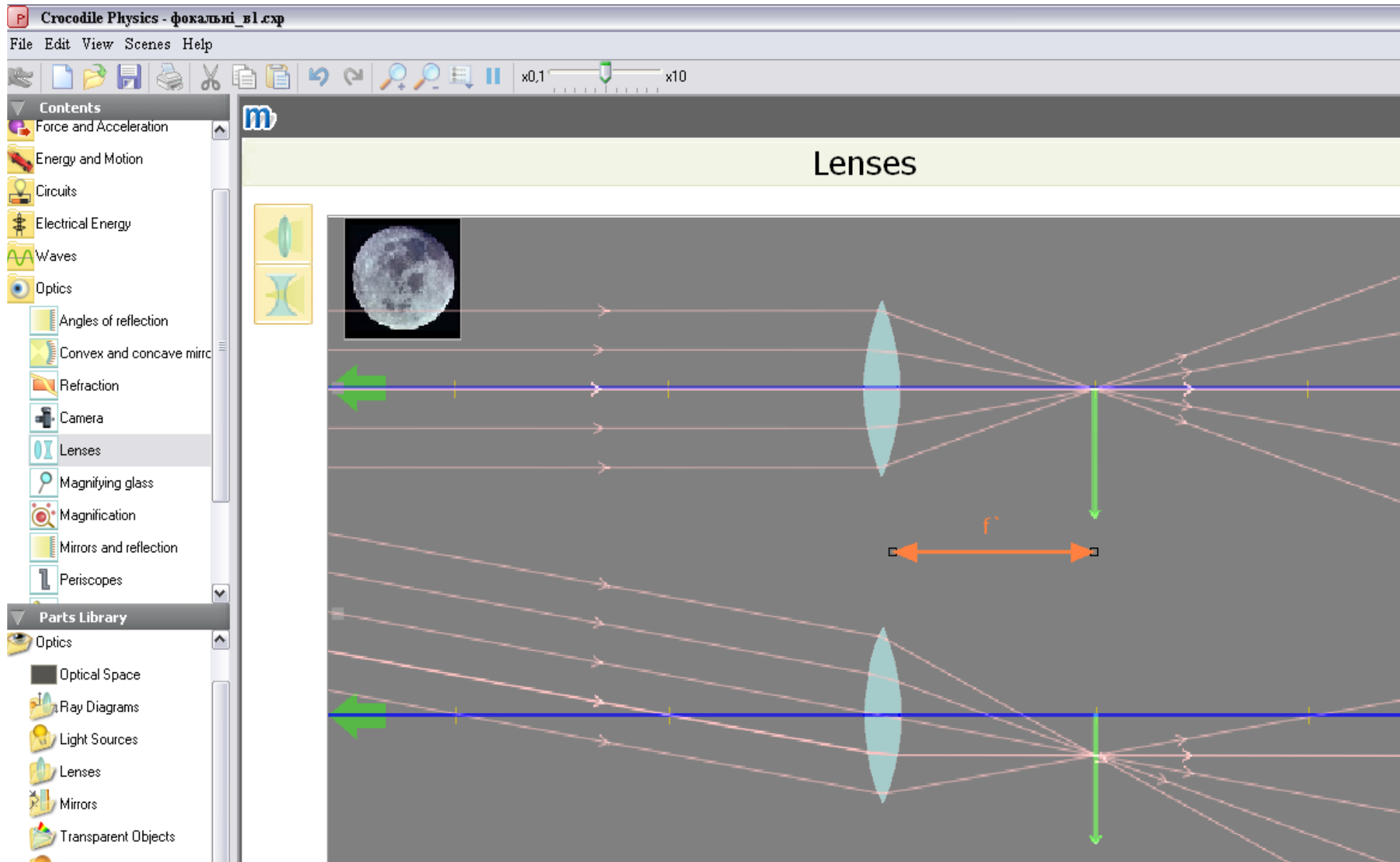


Рисунок 1.8 - Приклад виконання комп'ютерного моделювання оптичної системи рис.1.5 в

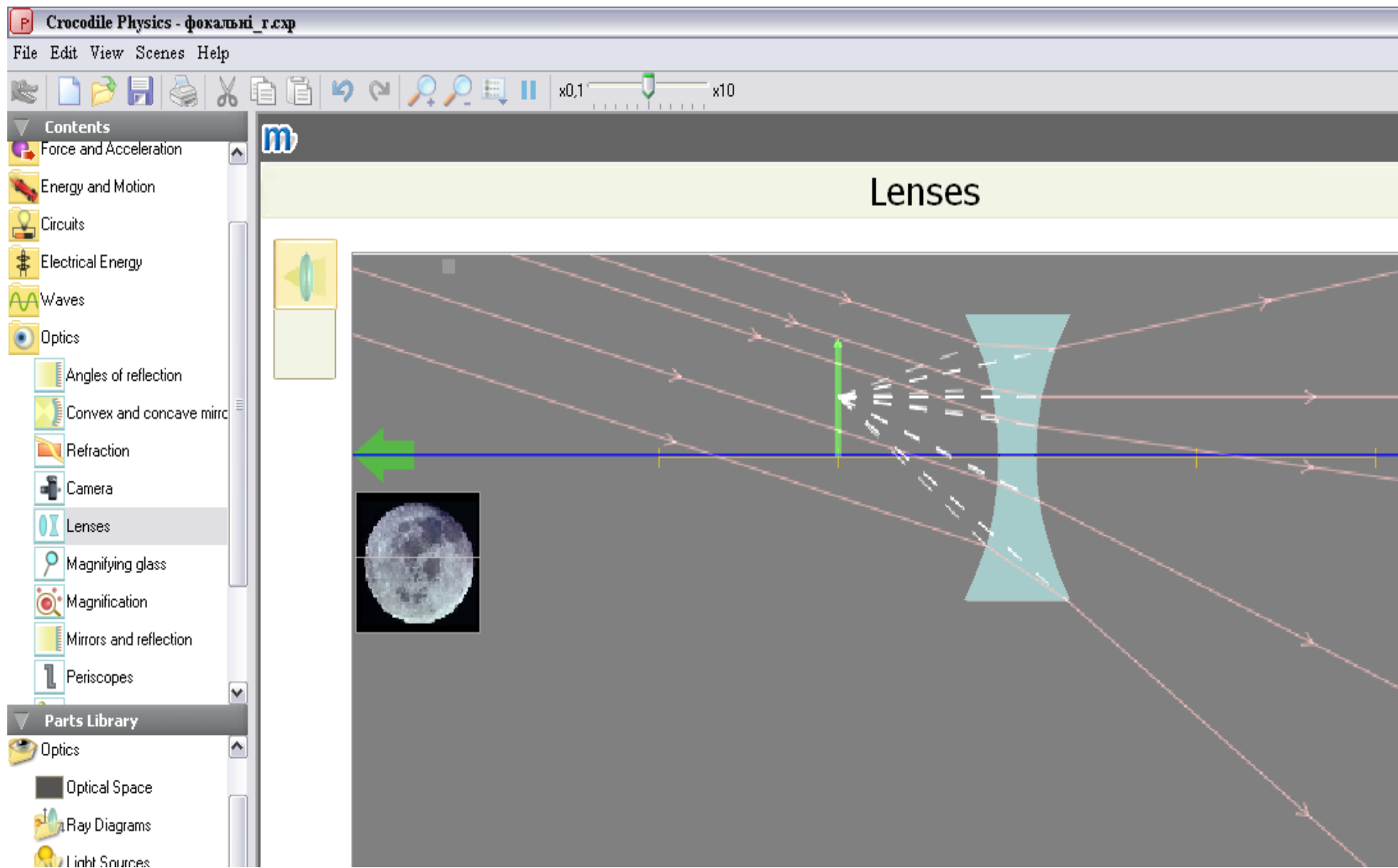


Рисунок 1.9 - Приклад виконання комп'ютерного моделювання оптичної системи рис.1.5 г

Завдання 2. Кутове та лінійне збільшення оптичної системи

Визначити кутове і лінійне збільшення оптичної системи.

варіант	Вихідні дані						Результати розрахунку									
	$-a$, мм	y , мм	$-f$, мм	$-z$, мм	$-\sigma$, градус	a' , мм	$-a$, мм	$-f$, мм	$-z$, мм	a' , мм	γ	β	σ'	z'	y'	
1	30	10	25		20											
2	55	10	25		20											
3		20	10	20	20											
4		20	15	10	20											
5	30	20			20	55										
6	25	10			20	15										
7	20	25		7,5	20											
8	20	25		15	20											
9	25	15	20		30											
10	45	15	35		30											
11		25	15	30	30											
12		28	17	15	30											
13	32	14			30	38										
14	36	15			30	24										
15	23	32		14	30											

Алгоритм розрахунку

Дано	визначити						
$-a$, мм; y , мм; $-f$, мм $-\sigma$, градус	$\gamma = \frac{z}{f'} = \frac{a-f}{f'}$	$\gamma = \frac{a}{a'} \Rightarrow a'$	$\beta = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{a'}{a}$	$\gamma \cdot \beta = 1$	$\gamma = \frac{\text{tg}(\sigma')}{\text{tg}(\sigma)} \Rightarrow \sigma'$	$z = a - f;$ $z' = a' - f'$	
$-a$, мм; y , мм; $-f$, мм; $-z$, мм; $-\sigma$, градус	$\gamma = \frac{z}{f'}$	$z = a - f \Rightarrow a'$ $\gamma = \frac{a}{a'} \Rightarrow a'$				$z' = a' - f'$	$\beta = \frac{y'}{y} \Rightarrow y'$
$-a$, мм; y , мм; a' , мм $-\sigma$, градус	$\gamma = \frac{a}{a'}$	$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \Rightarrow f'$				$z = a - f;$ $z' = a' - f'$	

$- a, \text{ мм}; y, \text{ мм}; -z, \text{ мм}$ $-\sigma, \text{ градус}$	$z = a - f \Rightarrow f$ $\gamma = \frac{z}{f'}$	$\gamma = \frac{a}{a'} \Rightarrow a'$				$z' = a' - f'$
---	--	--	--	--	--	----------------

File Edit View Insert Format Math Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

100%

$x = \int \frac{a}{b} dx$
 \sum
 $\frac{a}{b}$
 $\alpha\beta$

Greek				
α	β	γ	δ	ϵ
η	θ	ι	κ	λ
ν	ξ	\omicron	π	ρ
τ	υ	ϕ	χ	ψ
A	B	Г	Δ	E
H	Θ	I	K	Λ
N	Ξ	Ο	Π	Ρ
T	Υ	Φ	Χ	Ψ

Завдання 2. Кутове та лінійне збільшення оптичної системи

Дано:

- відстань від ОС до предмету
- фокусна відстань

$$a := -75$$

$$ff := 43 \quad f := -ff \quad f = -43$$

$$\sigma := -20 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$y := 26$$

- апертурний кут в області предметів
- розмір предмету

1. Визначаємо кутове збільшення оптичної системи за формулою:

$$\gamma = \frac{z}{f'} = \frac{a-f}{f'}$$

$$\gamma := \frac{a-f}{ff} \quad \gamma = -0.744$$

Із цієї ж формули:

$$\gamma = \frac{a}{a'} \Rightarrow a' = \frac{a}{\gamma} \quad aa := \frac{a}{\gamma} \quad aa = 100.781$$

2. Визначаємо лінійне збільшення оптичної системи:

$$\beta = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{a'}{a} \quad \beta := \frac{-f \cdot aa}{ff \cdot a} \quad \beta = -1.344$$

3. Визначаємо відстані в області предмету та зображення

$$z = a - f; \quad z := a - f \quad z = -32$$

$$z' = a' - f' \quad zz := aa - ff \quad zz = 57.781$$

4. Перевіряємо виконання умови $\gamma \cdot \beta = 1$ $\gamma \cdot \beta = 1$

5. Визначаємо кут σ' із формули $\gamma = \frac{tg(\sigma')}{tg(\sigma)} \Rightarrow tg(\sigma') = \gamma \cdot tg(\sigma)$ $\sigma\sigma := atan(\gamma \cdot tan(\sigma)) \cdot \frac{180}{\pi}$ $\sigma\sigma = 15.156$

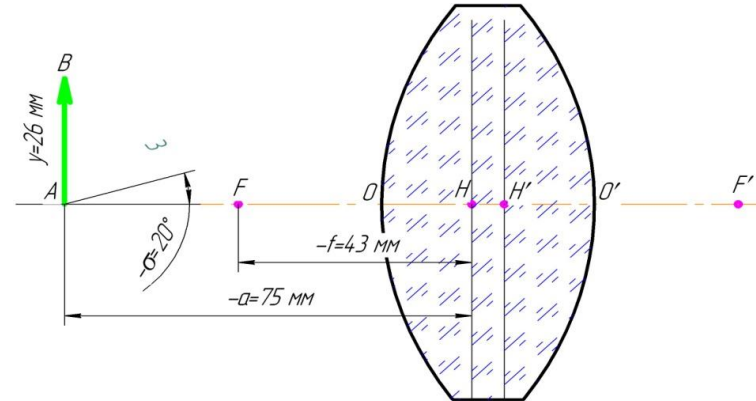
$$\sigma' = arctg(\gamma \cdot tg(\sigma))$$

6. Визначаємо розмір зображення із формули

$$\beta = \frac{y'}{y} \Rightarrow y' = \beta \cdot y \quad yy := \beta \cdot y \quad yy = -34.938$$

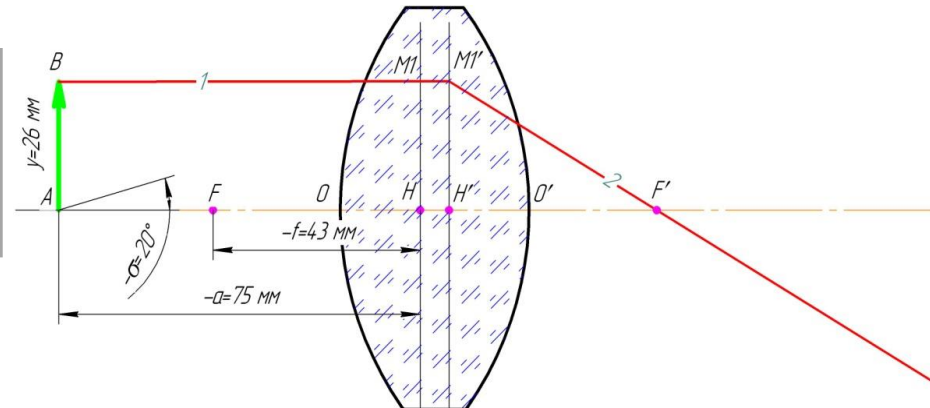
Алгоритм виконання побудови I - методом

1. Позначаємо на ескізі ОС параметри які задані для розрахунку



2. Визначаємо зображення точки B .

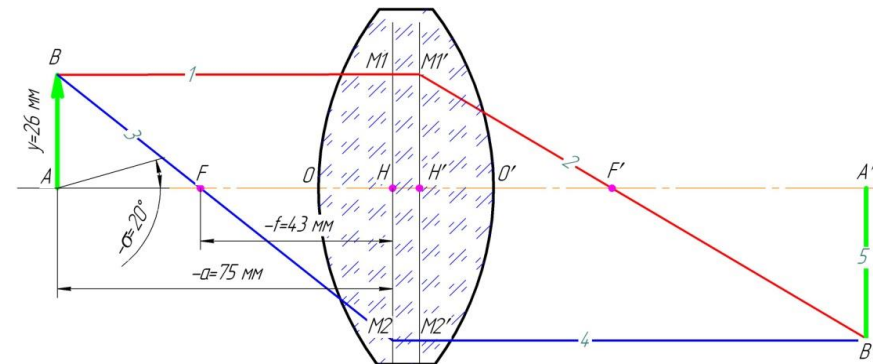
- Із точки B проводимо промінь паралельно до оптичної осі до перетину з передньою та задньою головною площиною в точках $M1$ і $M1'$. З точки $M1'$ через задній фокус F' проводимо промінь.



- Із точки B проводимо промінь через передній фокус F до перетину з передньою площиною H (точка $M2$). Із точки $M2$ проводимо промінь паралельно до оптичної осі.

- Точка перетину 2 та 4 променю є зображенням B'

- Із отриманої точки B' опускаємо перпендикуляр на оптичну вісь – маємо зображення точки A'

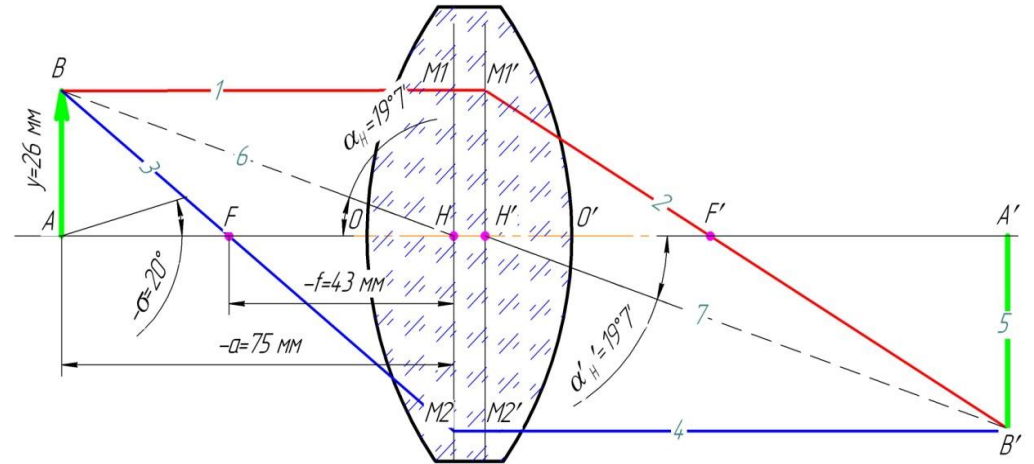


- Виконуємо перевірку побудови зображення. Із точки B через передню головну площину H проводимо відрізок BH . Цей відрізок утворює з оптичною віссю кут α_H . Визначаємо кут із трикутника

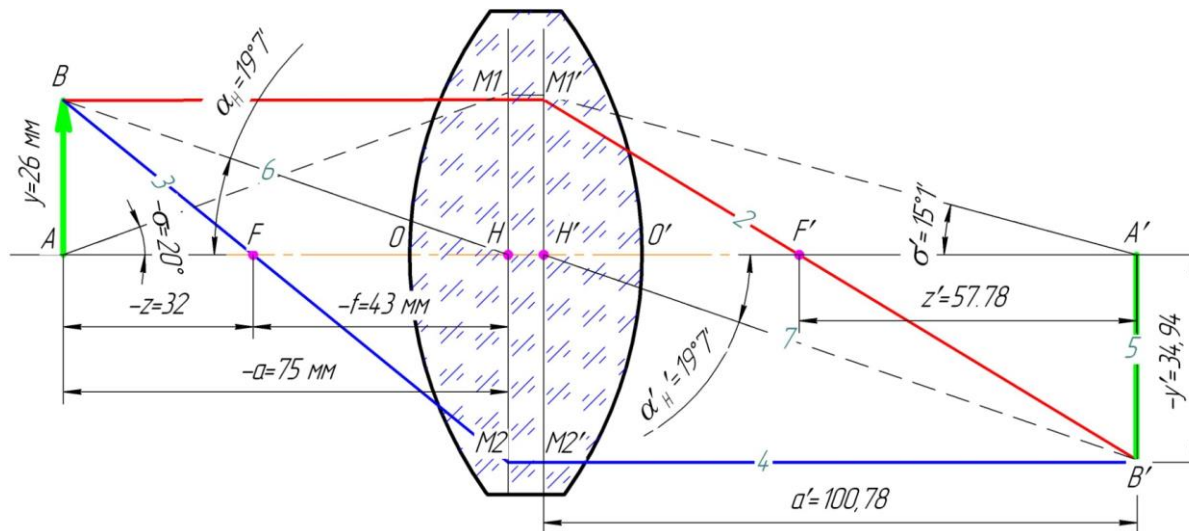
$$BAN: AB = AH \cdot \operatorname{tg}(\alpha_H) \Rightarrow \alpha_H = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{a}\right).$$

- Оскільки фокуси рівні $-f = f'$, то із точки H' під цим же кутом проводимо промінь $H'2$.

- При правильному виконанні побудови промінь 7 повинен точно спрямуватися в точку перетину 2 та 4 променів

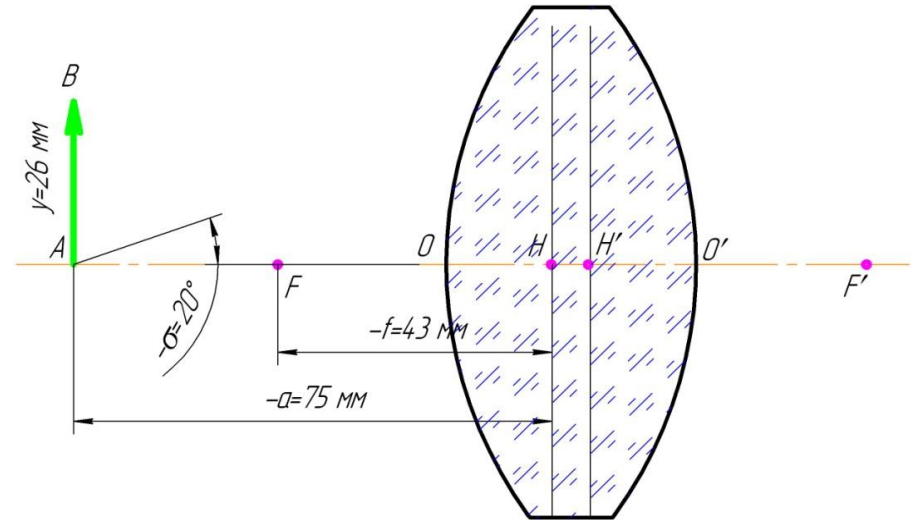


3. Проставляємо всі розміри отримані побудовою та перевіряємо із розрахованими (повинні співпадати з невеликою похибкою)



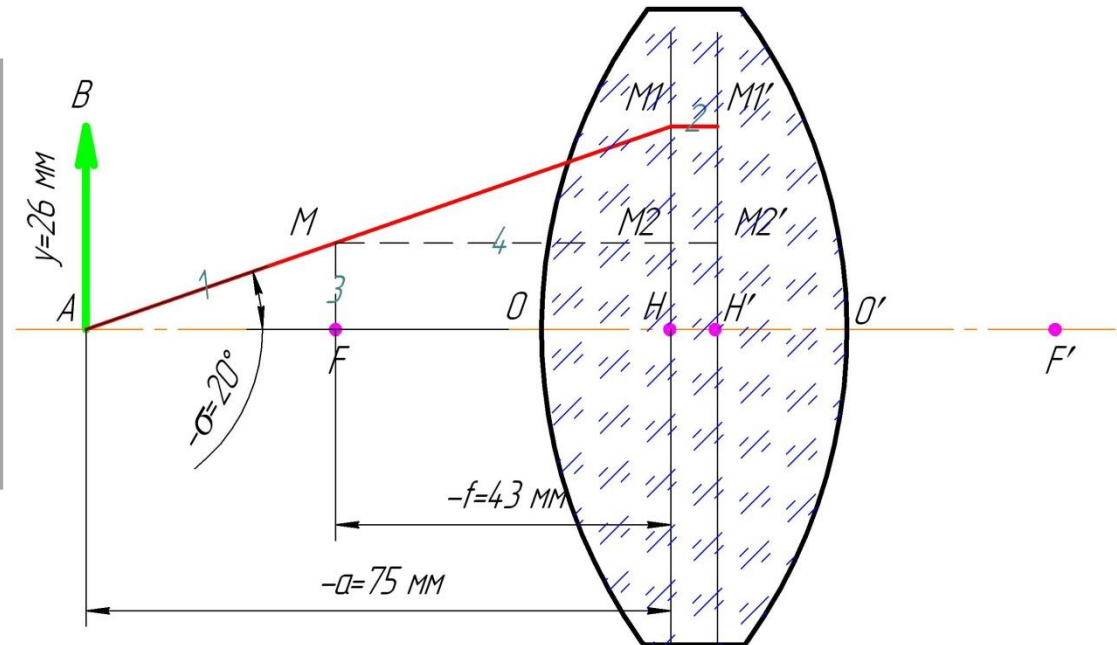
Алгоритм виконання побудови II - методом

1. Позначаємо на ескізі ОС параметри які задані для розрахунку

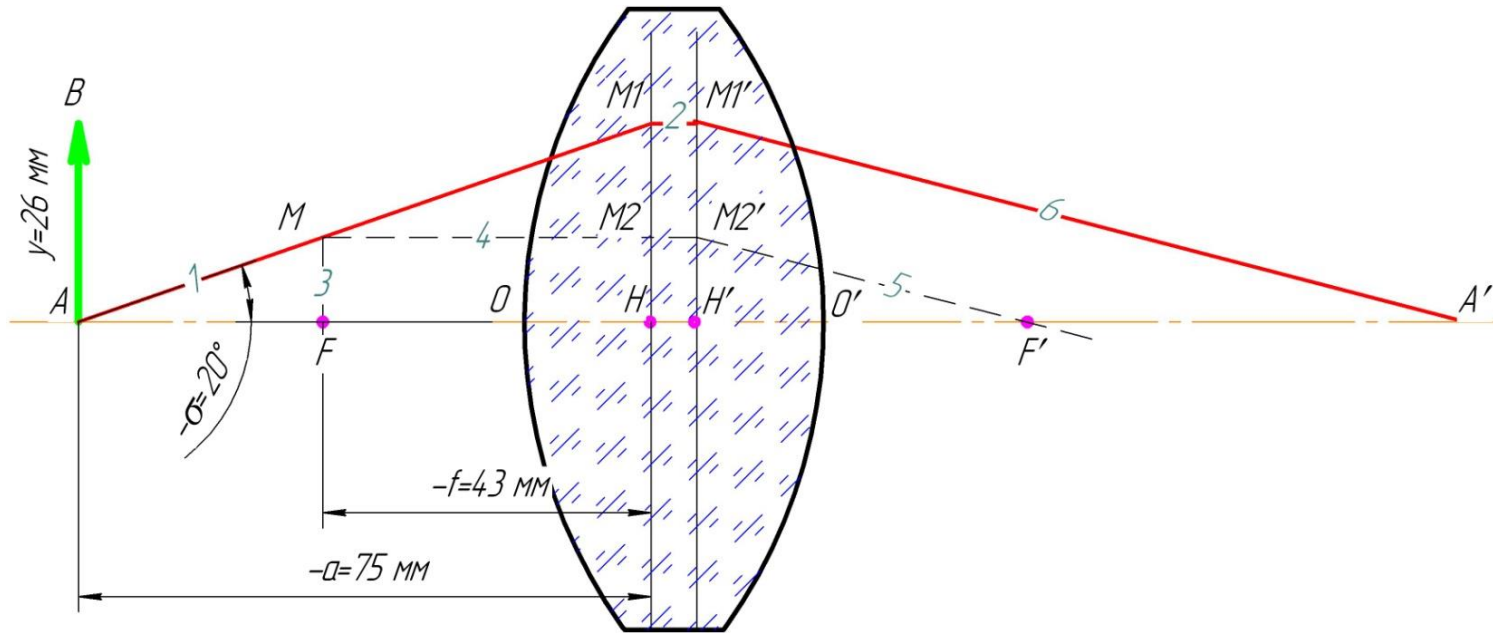


2. Визначаємо зображення точки A .

- Під кутом $-\sigma = 20^\circ$ проводимо відрізок AM_1 до перетину з передньою головною площиною. Проводимо відрізок $M_1 M_1'$ паралельно осі до перетину з задньою головною площиною;
- Із точки F проводимо перпендикуляр FM до перетину в променем AM_1 . З точки M проводимо промінь до перетину з площиною H і H' в точках M_2 і M_2' .



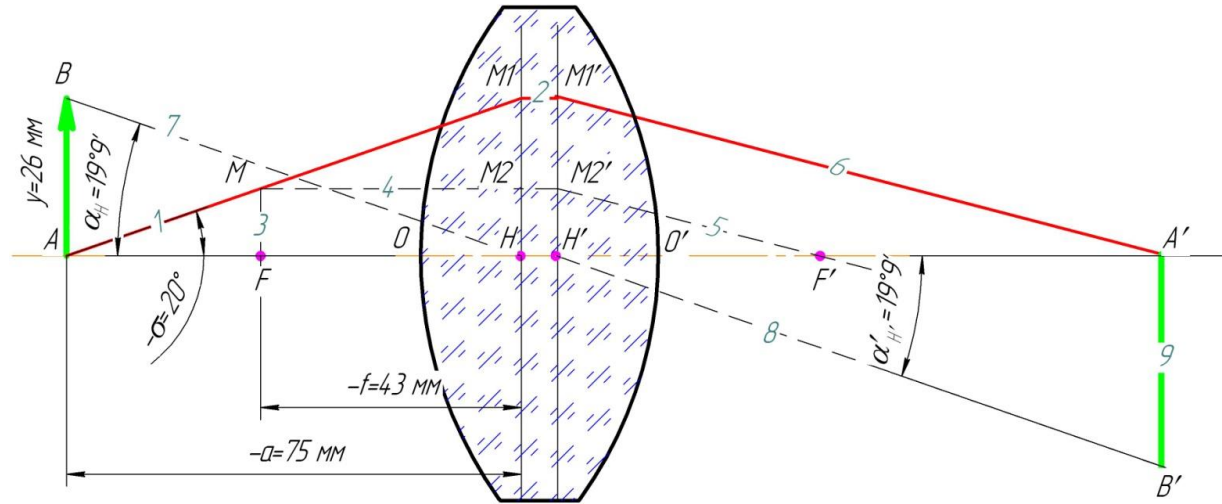
- Із точки $M2'$ проводимо промінь через задній фокус F' ;
- Із точки $M1'$ проводимо промінь, що паралельний відрізку $M2F'$, до перетину з оптичною віссю. Точка перетину A' є зображенням точки A .



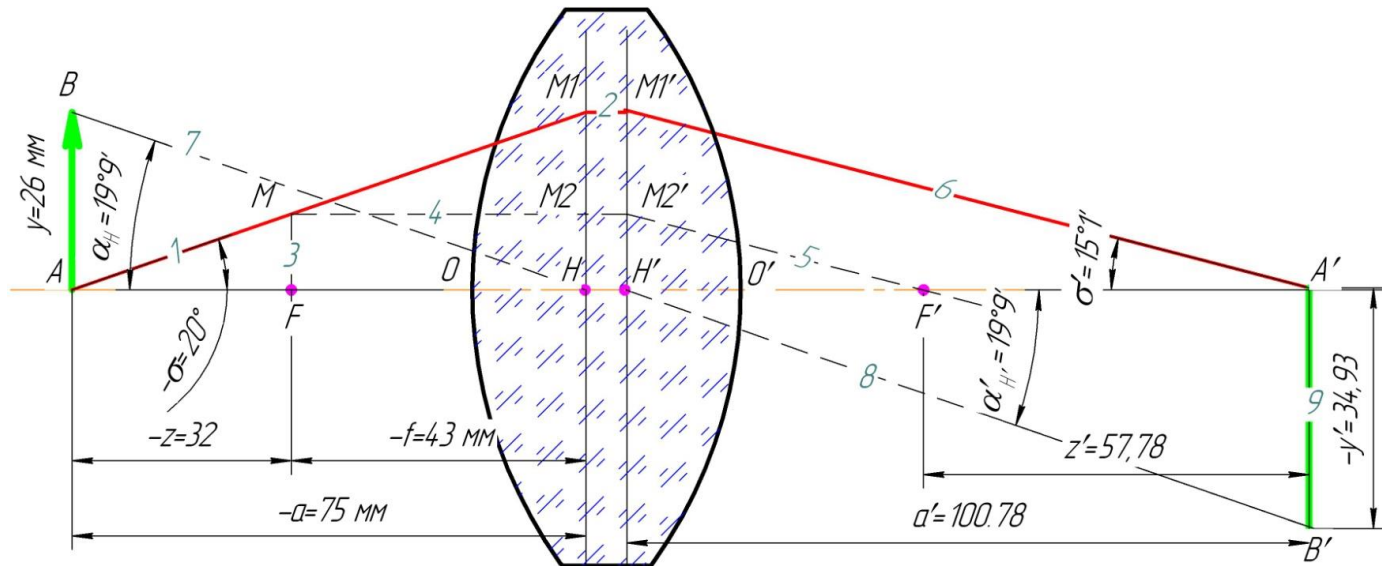
3. Визначаємо зображення точки В.

- Із точки B через передню головну площину H проводимо відрізок BH . Цей відрізок утворює з оптичною віссю кут α_H . Визначаємо кут із трикутника BAH :

$$AB = AH \cdot \operatorname{tg}(\alpha_H) \Rightarrow \alpha_H = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{a}\right) = 19^{\circ}12'$$
- Оскільки фокуси рівні $-f = f'$, то із точки H' під цим же кутом проводимо промінь H' .



4. Проставляємо всі розміри отримані побудовою та перевіряємо із розрахунками (повинні співпадати з невеликою похибкою)



Завдання 3. Повздожжє збільшення оптичної системи

Дано відрізок ΔZ , фокусна відстань $-f$, відстань до предмета $-a$. Побудувати зображення повздожнього предмета. Розрахувати основні параметри оптичної системи.

ва рі ан т	Вихідні дані			Розрахункові результати					
	$-a,$ мм	$-\Delta Z,$ мм	$-f,$ мм	$z_1,$ мм	$z_2,$ мм	$z'_1,$ мм	$z'_2,$ мм	$\Delta z',$ мм	α
1	87	15	30						
2	75	15	35						
3	85	15	40						
4	77	17	30						
5	87	17	35						
6	95	17	45						
7	92	18	50						
8	84	22	50						
9	75	24	35						
10	37	5	15						
11	30	5	15						
12	25	5	15						
13	45	10	21						
14	60	10	21						
15	95	15	35						

Приклад 1.2

Дано відрізок $A_1A_2 = -\Delta Z = 22$ мм, фокусна відстань $-f = 43$ мм, відстань до предмета $-a = 91$ мм. Побудувати зображення предмету.

Рішення

1. Із рис.1.10 визначаємо відстань $z_1 = a - f = -91 - (-43) = -48$ мм.

Тоді відстань $z_2 = z_1 - \Delta Z = -48 - (-22) = -26$ мм.

2. Визначаємо відрізки:

$$z'_1 = \frac{f \cdot f'}{z_1} = \frac{-43 \cdot 43}{-48} = 38,52 \text{ мм}; \quad z'_2 = \frac{f \cdot f'}{z_2} = \frac{-43 \cdot 43}{-26} = 71,11 \text{ мм}$$

3. Визначаємо розмір предмету:

$$\Delta z' = z'_2 - z'_1 = 71,11 - 38,52 = 32,59 \text{ мм}$$

$$\Delta z' = f \cdot f' \cdot \left(\frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1} \right) = -43 \cdot 43 \cdot \left(\frac{1}{-26} - \frac{1}{-48} \right) = 32,48 \text{ мм}$$

$$\Delta z' = \frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1} \cdot (z_1 - z_2) = \frac{-43 \cdot 43}{-26 \cdot (-48)} \cdot (-48 - (-26)) = 32,59 \text{ мм}$$

4. Повздовжнє збільшення оптичної системи:

$$\alpha = \frac{\Delta z'}{\Delta z} = \frac{32,59}{-22} = -1,48$$

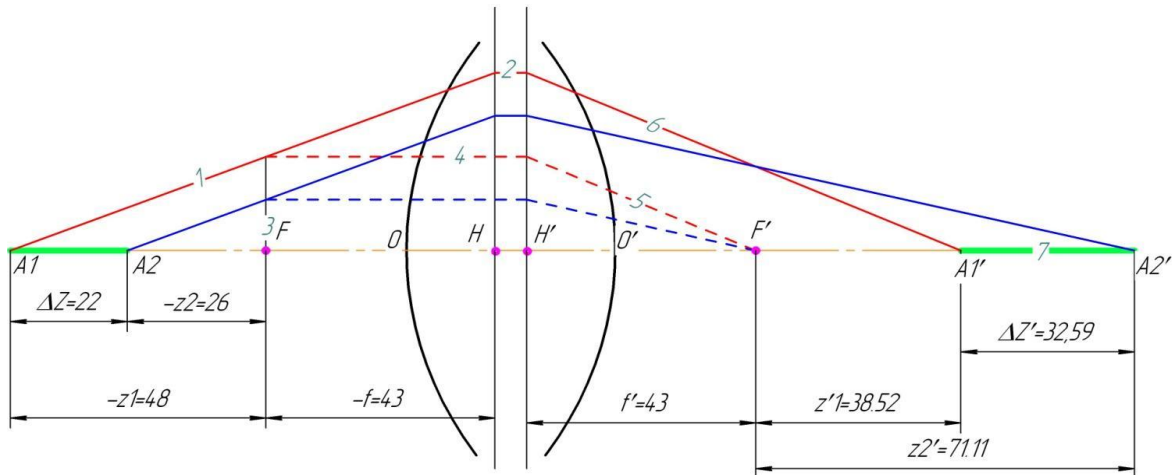


Рисунок 1.10 - Побудова зображення повздовжнього предмета

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

- 1 В якому граничному випадку хвильова оптика переходить в геометричну.
2. Які промені називають параксіальними?. Якими параметрами задають промінь на опорній площині?
3. Якими властивостями володіють фокальні точки оптичної системи? Що таке головні площини?
4. Як можна визначити перетворення параксіального променя в оптичній системі, якщо відомо положення її кардинальних точок?
5. Що таке спряжені площини? Як знайти в просторі зображення площину, спряжену з деякою площиною в просторі предметів?

Література

1. Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів: навч. посібник / А. С. Литвиненко, Г. О. Петченко, О. М. Ляшенко, О. М. Діденко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 139 с.
2. Комп'ютерні методи проектування оптико-механічних систем. [Електронний ресурс]: навч.посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спец.: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. К. Кучеренко. – Електрон. текст. дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. –169 с
3. Чиж І. Г. Теорія оптичних систем : підручник / І. Г. Чиж. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 426 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2 ГРАФІЧНА ПОБУДОВА ЗОБРАЖЕНЬ ЛІНЗАМИ

Мета роботи

1. Ознайомитися з основними положеннями геометричної оптики.
2. Визначити кардинальні точки оптичної системи.
3. Побудувати зображення предмету для додатної та від'ємної лінзи.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Лінійне та кутове збільшення оптичної системи.
2. Властивість фокальних площин.

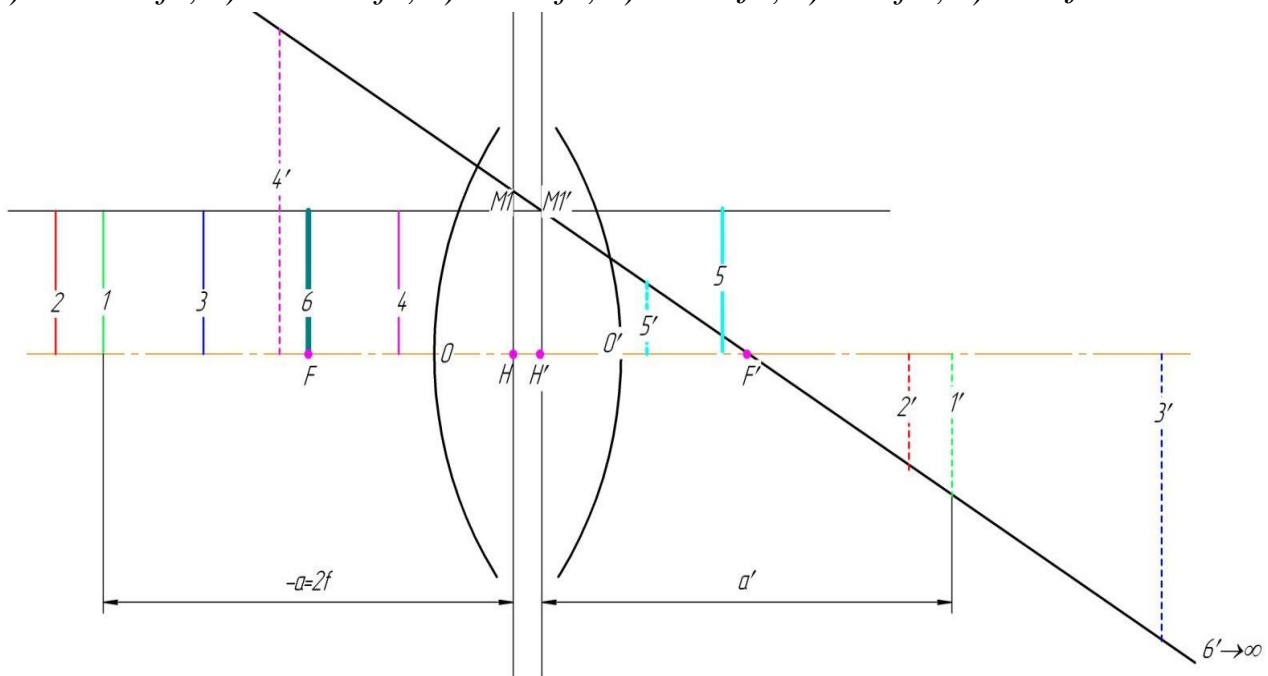
2. Теоретичні відомості

Знаючи фокусну відстань і положення кардинальних точок лінзи, можна графічно побудувати зображення предмету.

На рис.2.1 показана побудова зображень і переміщення їх в залежності від переміщення предмету для збиральної і розсіювальної тонкої лінзи, що знаходиться в повітрі. Для побудови вибирають промені, хід яких заздалегідь відомий. На рис.2.1 показано побудова зображення для п'яти положень предмету, яке задається відстанню $-a$:

предмету, яке задається відстанню $-a$:

- 1) $-a = 2 \cdot f$; 2) $-a > 2 \cdot f$; 3) $-a > f$; 4) $-a < f$; 5) $a < f'$; 6) $a = f'$.



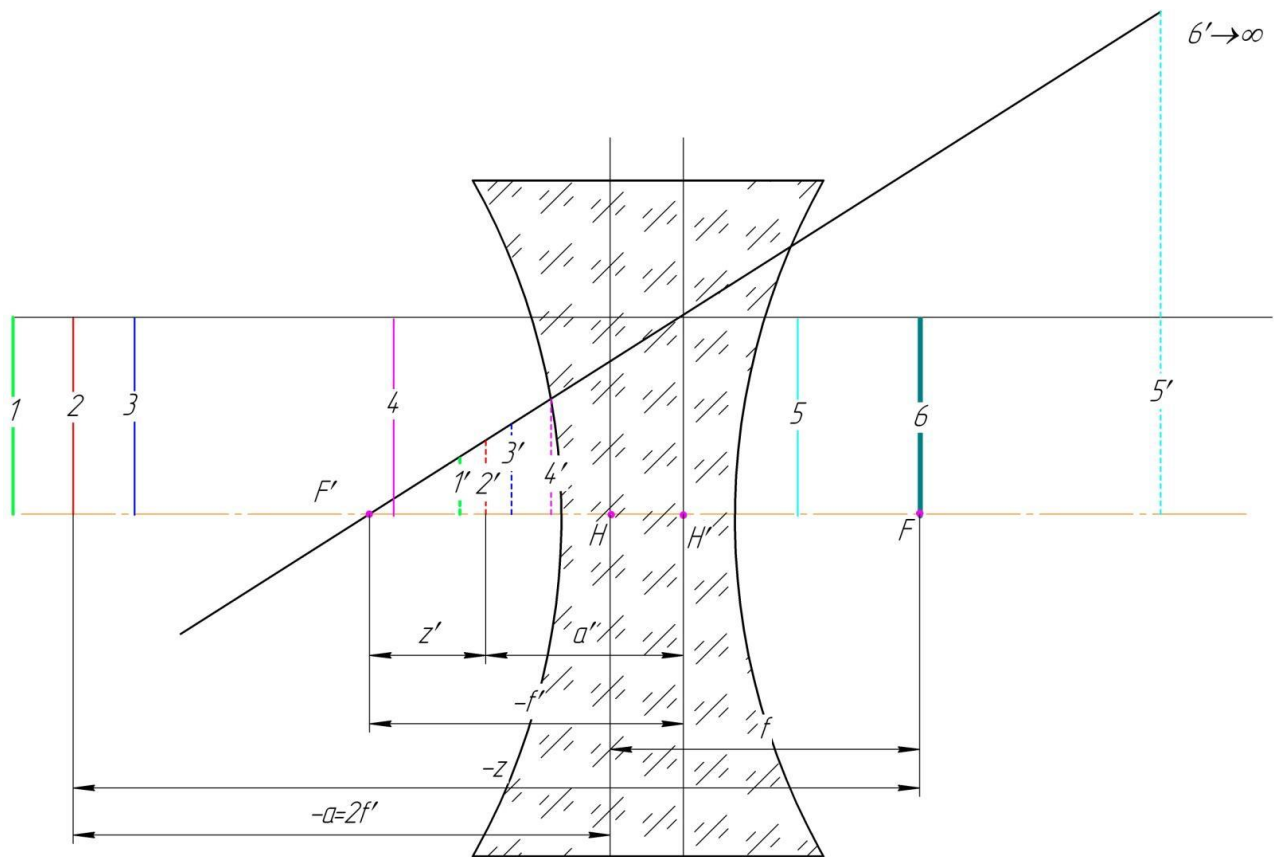


Рисунок 2.1 - Побудова зображення лінзами: а) збиральною;
б) розсіювальною

3. Виконання роботи

Завдання 1. Побудова зображення збиральною лінзою

Побудувати зображення лінзою додатною в залежності від відстані до предмету.

варіант	1					2					3					
предмет	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
д а н о	$a, \text{ мм}$	-56	-66	-46	-20	+28	-60	-70	-50	-20	+30	-66	-76	-56	-25	+25
	$f', \text{ мм}$	28					30					33				
	$y, \text{ мм}$	12,5					15,25					19,75				

варіант	4					5					6					
предмет	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
д а н о	$a, \text{ мм}$	-70	-80	-60	-25	+28	-74	-84	-64	-25	+25	-84	-94	-74	-30	+35
	$f', \text{ мм}$	35					37					42				
	$y, \text{ мм}$	25,42					23,56					22,49				

варіант		7					8					9				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Д а н о	$a, \text{мм}$	-20	-30	-15	-6	+10	-14	-24	-10	-3	7	-10	-20	-7	-2	+5
	$f', \text{мм}$	10					7					5				
	$y, \text{мм}$	21,25					21,55					21,7				

варіант		10					11					12				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Д а н о	$a, \text{мм}$	-50	-60	-40	-20	+25	-40	-50	-30	-15	+20	-34	-44	-24	-10	+17
	$f', \text{мм}$	25					20					17				
	$y, \text{мм}$	25,5					26,75					23,25				

варіант		13					14					15				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Д а н о	$a, \text{мм}$	-80	-90	-70	-20	+40	-30	-40	-20	-10	+15	-44	-54	-34	-15	+10
	$f', \text{мм}$	40					15					22				
	$y, \text{мм}$	26					24,23					21,71				

Приклад 1

Дано: $-a = 86 \text{ мм}$, $f' = 43 \text{ мм}$, $y = 26 \text{ мм}$, $f = -f'$, $-\sigma = 20^\circ$

Таблиця 2.1 - Результати розрахунку додатної лінзи в залежності від відстані до предмета

предмет		1	2	3	4	5
дано	a	-86	-95	-65	-25	+44
	f'	43				
	y	26				
розр ахун кові резу льта ти	$z = a - f'$	-43	-52	-22	+18	+87
	$\gamma = \frac{z}{f'}$	-1	-1,209	-0,512	+0,419	+2,023
	$a' = \frac{a}{\gamma}$	+86	+78,55	+127,04	-59,722	+21,74
	$\beta = \frac{-f'}{f'} \cdot \frac{a'}{a}$	-1	-0,827	-1,955	+2,389	+0,497
	$\sigma' = \arctg(\gamma \cdot \text{tg}(\sigma))$	20	23,75	10,549	-8,66	-36,36
	$z' = a' - f'$	+43	+35,55	+84,04	-102,77	-21,25
	$y' = \beta \cdot y$	-26	-21,55	-50,818	+62,11	+12,85
рисунок		2.2			2.3	2.4

*Примітка

1. Знак z, z' при побудові визначається відносно фокуса.
2. Знак a, a' при побудові визначається відносно головних площин.

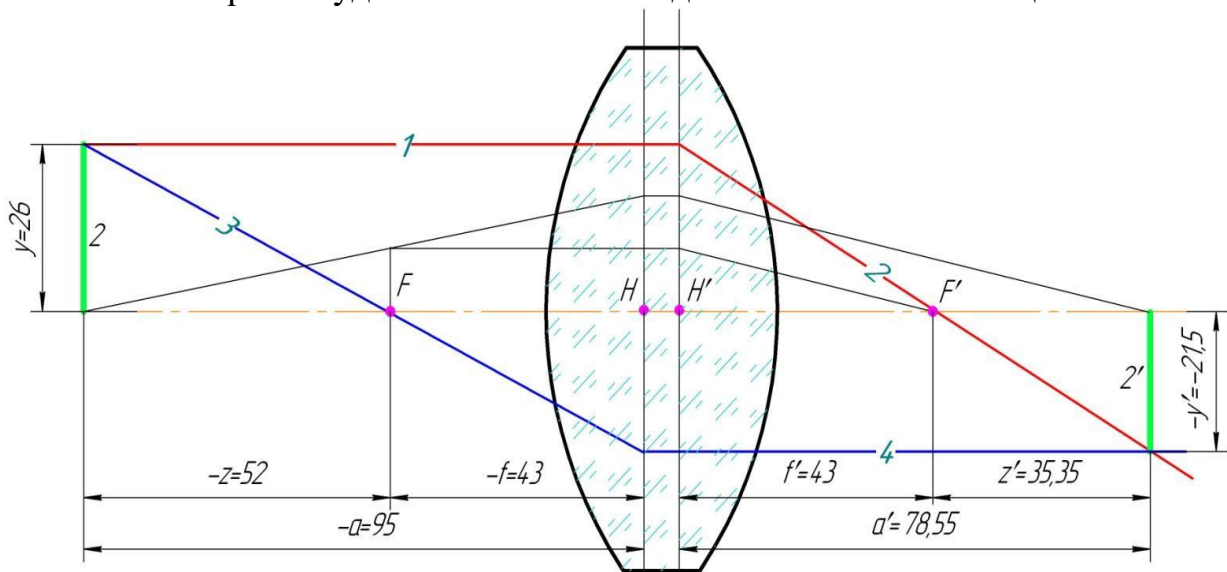


Рисунок 2.2 - Приклад побудови зображення додатною лінзою для розташування предмету 1, 2, 3

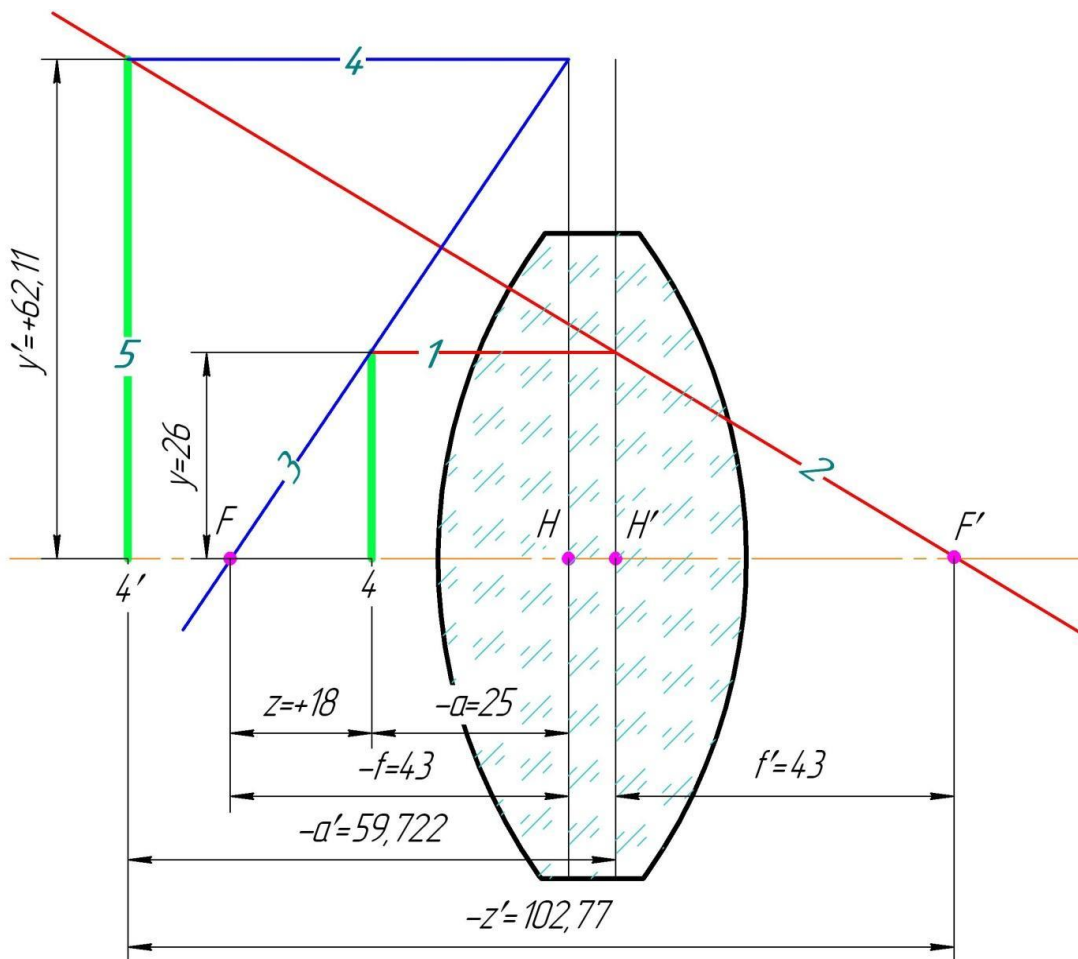


Рисунок 2.3 - Приклад побудови зображення додатною лінзою для розташування предмету 4

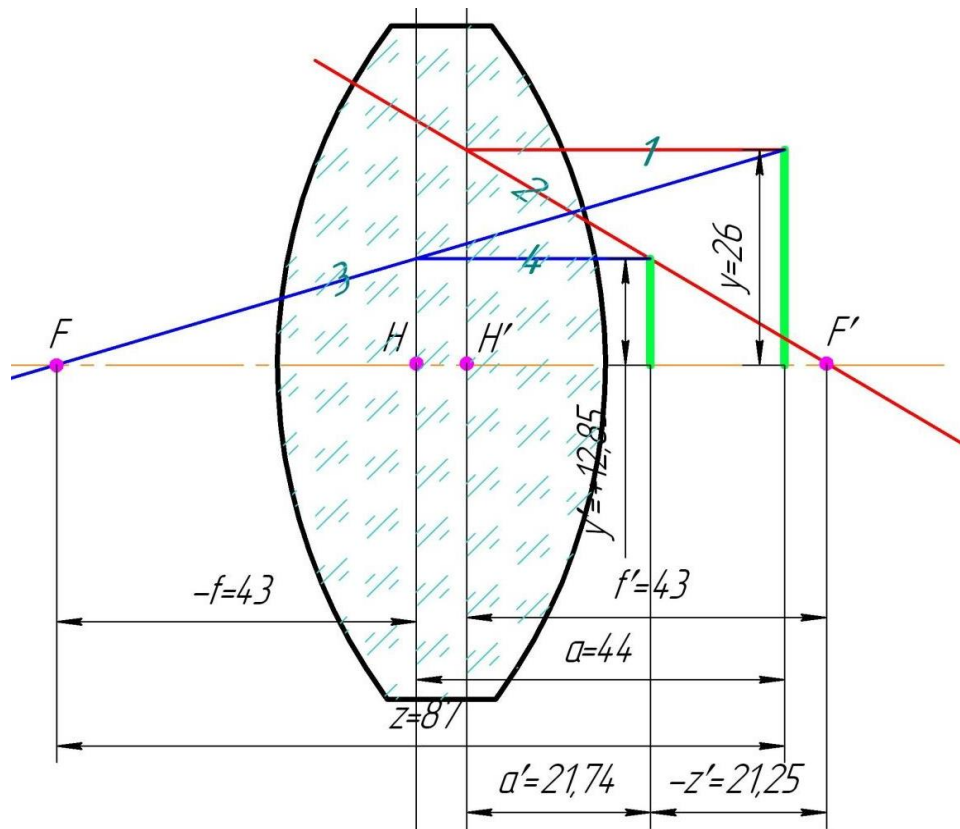


Рисунок 2.4 - Приклад побудови зображення додатною лінзою для розташування предмету 5

Завдання 2. Побудова зображення розсіювальною лінзою

Побудувати зображення лінзою від'ємною в залежності від відстані до предмету (використовувати формули прикладу 1).

варіант		1					2					3				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Д а н о	$a, \text{мм}$	-68	-58	-48	-38	+17	-74	-64	-54	-44	+18	-78	-68	-58	-48	+19
	$f', \text{мм}$	-29					-32					-34				
	$y, \text{мм}$	26,5					27					27,5				

варіант		4					5					6				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Д а н о	$a, \text{мм}$	-82	-72	-62	-52	+20	-88	-78	-68	-58	+21	-92	-82	-72	-62	+22
	$f', \text{мм}$	-36					-39					-41				
	$y, \text{мм}$	28					28,5					29				

варіант		7					8					9				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Д а н о	$a, мм$	-22	-12	-10	-4	+4	-26	-16	-12	-5	+5	-30	-18	-15	-7	+7
	$f', мм$	-6					-8					-9				
	$y, мм$	18					21					23				

варіант		10					11					12				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Д а н о	$a, мм$	-35	-24	-17	-8	+8	-35	-32	-20	-10	+10	-40	-36	-25	-15	+15
	$f', мм$	-12					-16					-9				
	$y, мм$	23,5					24					23				

варіант		13					14					15				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Д а н о	$a, мм$	-52	-42	-30	-18	+5	-56	-46	-35	-20	+10	-64	-54	-44	-30	+15
	$f', мм$	-21					-23					-27				
	$y, мм$	25					25,5					26				

Приклад 2

Таблиця 2.2 - Результати розрахунку від'ємної лінзи в залежності від відстані до предмета

предмет		1	2	3	4	5
дано	a	-156	-146	-136	-53	43,6
	f'	-73				
	y	46				
розр ахун кові резу льта ти	$z = a - f'$	-229	-219	-209	-126	-29,4
	$\gamma = \frac{z}{f'}$	+3,137	+3	+2,86	+1,72	+0,403
	$a' = \frac{a}{\gamma}$	-49,72	-48,667	-47,5	-30,7	+108,25
	$\beta = \frac{-f'}{f'} \cdot \frac{a'}{a}$	+0,319	+0,333	+0,349	+0,579	+2,48
	$\sigma' = \arctg(\gamma \cdot \tg(\sigma))$	-48,78	-47,51	-46,18	-32,13	-8,33
	$z' = a' - f'$	+23,27	+24,333	+25,49	+42,29	+181,25
	$y' = \beta \cdot y = -26мм$	+14,66	+15,333	+16,06	+26,65	+114,21
рисунок		2.5			2.6	2.7

*Примітка

1. Знак z, z' при побудові визначається відносно фокуса.
2. Знак a, a' при побудові визначається відносно ГОЛОВНИХ ПЛОЩИН.

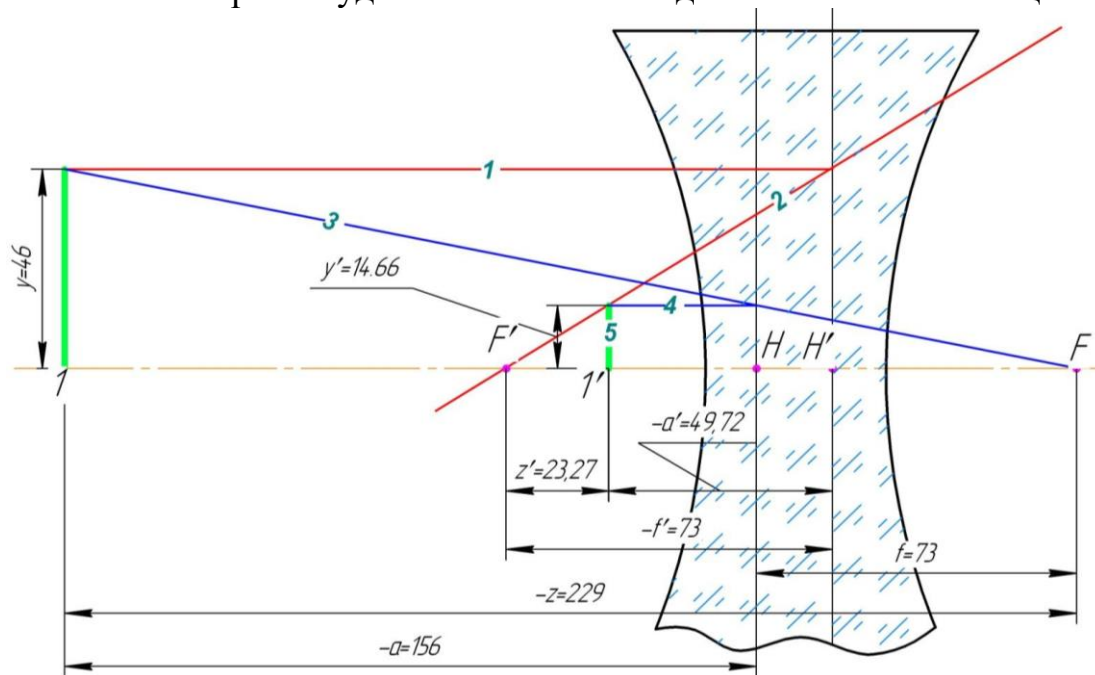


Рисунок 2.5 - Приклад побудови зображення від'ємною лінзою для розташування предмету 1, 2, 3

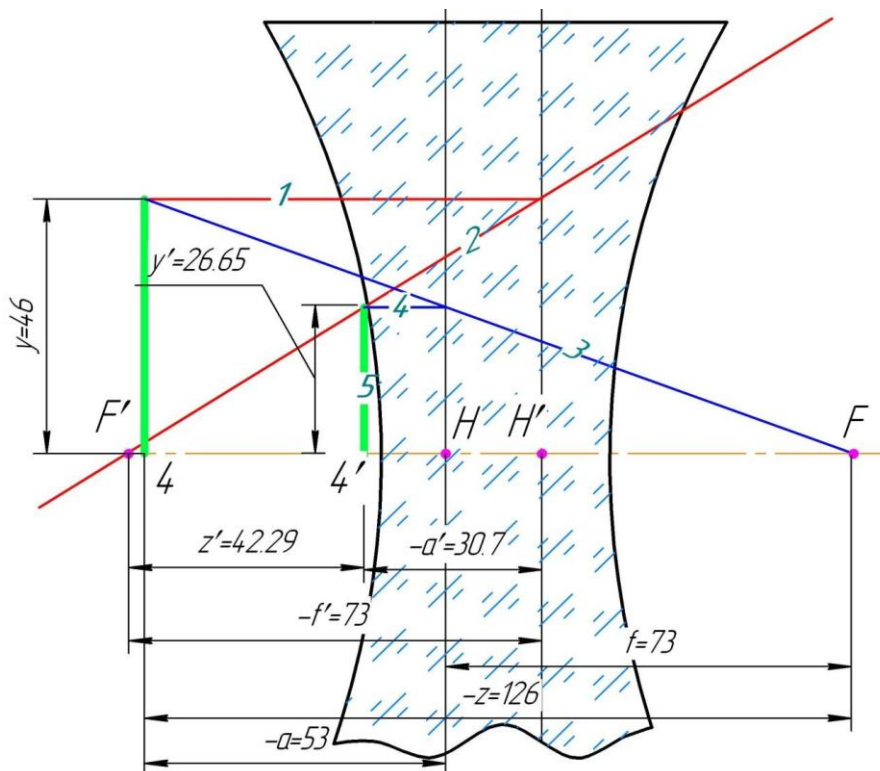


Рисунок 2.6 - Приклад побудови зображення від'ємною лінзою для розташування предмету 4

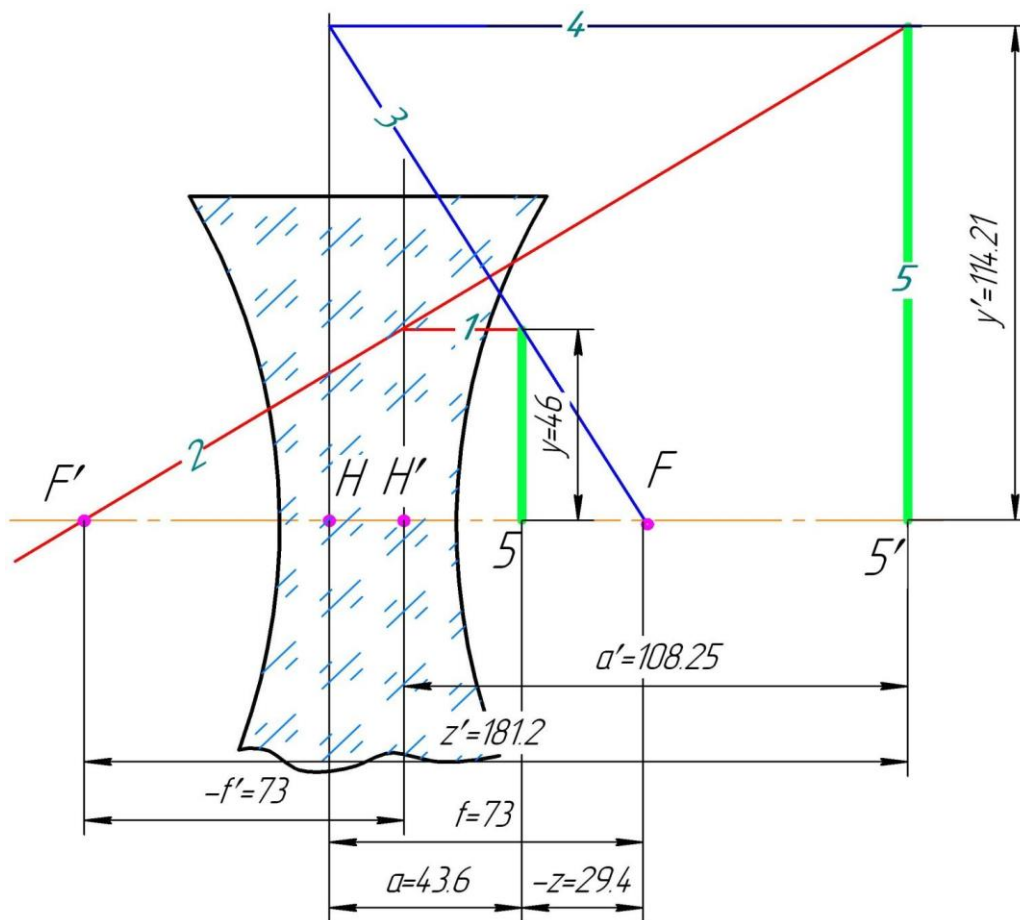


Рисунок 2.7 - Приклад побудови зображення від'ємною лінзою для розташування предмету 5

Завдання 3. Побудова зображення нахилоного предмета збиральною лінзою

Побудувати зображення в збиральній лінзі плоского предмета АВ нахилоного до головної оптичної осі $-\sigma = 110$ градус. Вихідні дані для розрахунку взяти із завдання 1.

Приклад 3

Побудувати зображення в збиральній лінзі плоского предмета АВ нахилоного до головної оптичної осі на кут $\sigma = 110^\circ$

предмет		1	2	3	4	5
дано	a	-86	-95	-65	-25	+44
	f'	43				
	y	27* 12**				
розр ахун кові резу льта ти	$z = a - f$	-43	-52	-22	+18	+87
	$\gamma = \frac{z}{f'}$	-1	-1,209	-0,512	+0,419	+2,023
	$a' = \frac{a}{\gamma}$	+86	+78,55	+127,04	-59,722	+21,74
	$\beta = \frac{-f}{f'} \cdot \frac{a'}{a}$	-1	-0,827	-1,955	$\beta = \beta_1 + \beta_2 =$ $= 2,389 + 2,389$ $= 4,778$	+0,497
	$\sigma' = \arctg(\gamma \cdot \tg(\sigma))$	-70	-73,249	-54,572	48,994	79,802
	$z' = a' - f'$	+43	+35,55	+84,04	-102,77	-21,25
	$y' = \beta \cdot y$	-39	-32,253	-76,245	+186,342	+19,276
рисунок	7		8	9, 10	11, 12	
Примітка						
* Розташування предмету над оптичною віссю;						
** Розташування предмету під оптичною віссю						

Рішення

1. Виконуємо подову зображення нахиленого предмету AB .
2. Виконуємо побудову зображення точки B та C використовуючи I метод побудови.
3. Виконуємо побудову зображення точки B та C використовуючи II метод побудови.
 - Продовжуємо площину предмету до перетину з передньою головною площиною (промінь 1);
 - Із точки F промінь 2 до перетину з променем 1. Із отриманої точки паралельно до оптичної осі до перетину із задньою головною площиною (промінь 3);
 - Із отриманої точки промінь 4 через задній фокус F' ;
 - Повертаємося до променя 1. Від задньої головної проводимо промінь 5 який паралельний до променя 4;
 - Виконуємо побудову зображення точки B (промені 6, 7 до перетину з променем 5);
 - Виконуємо побудову зображення точки C аналогічно.

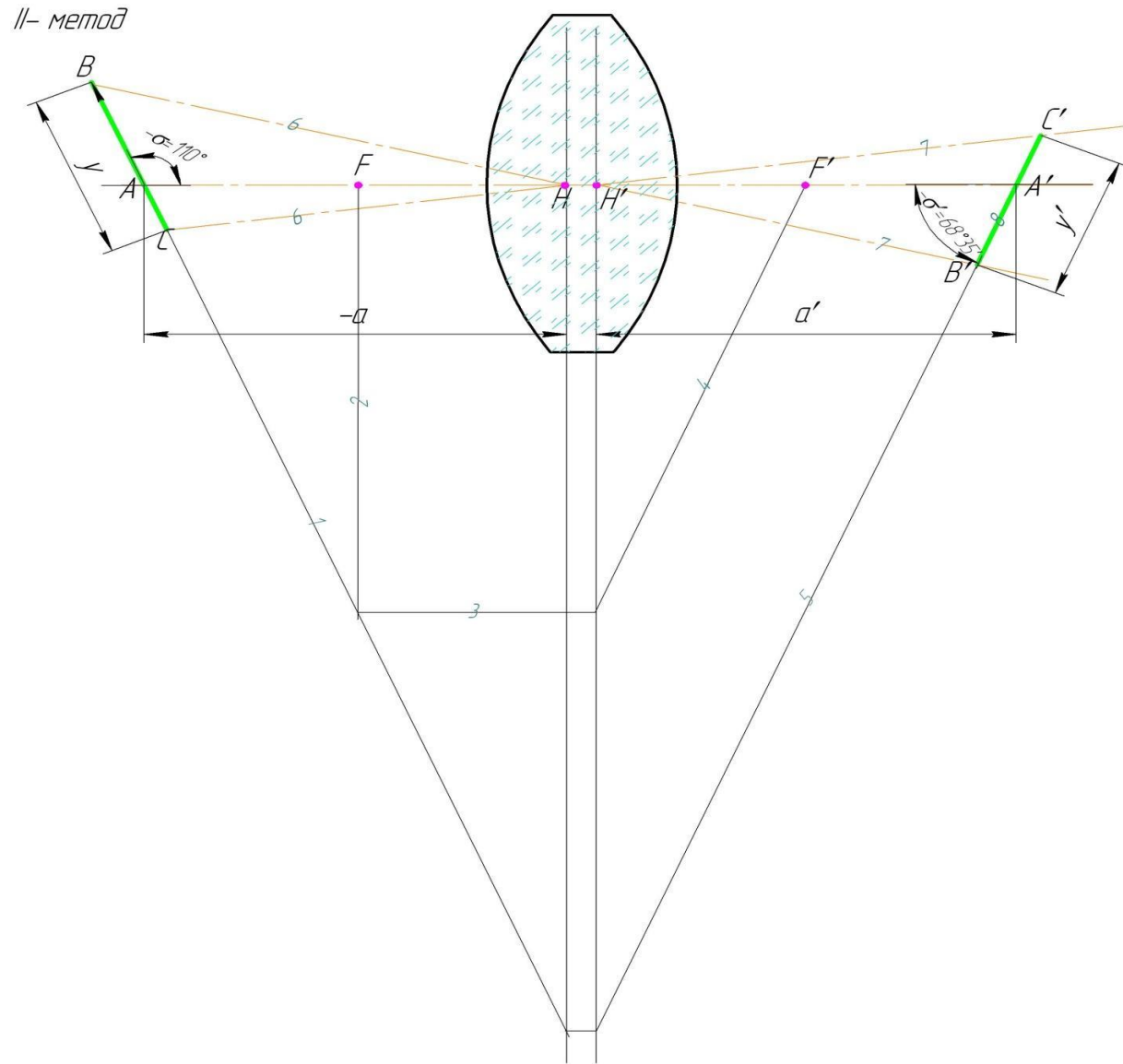
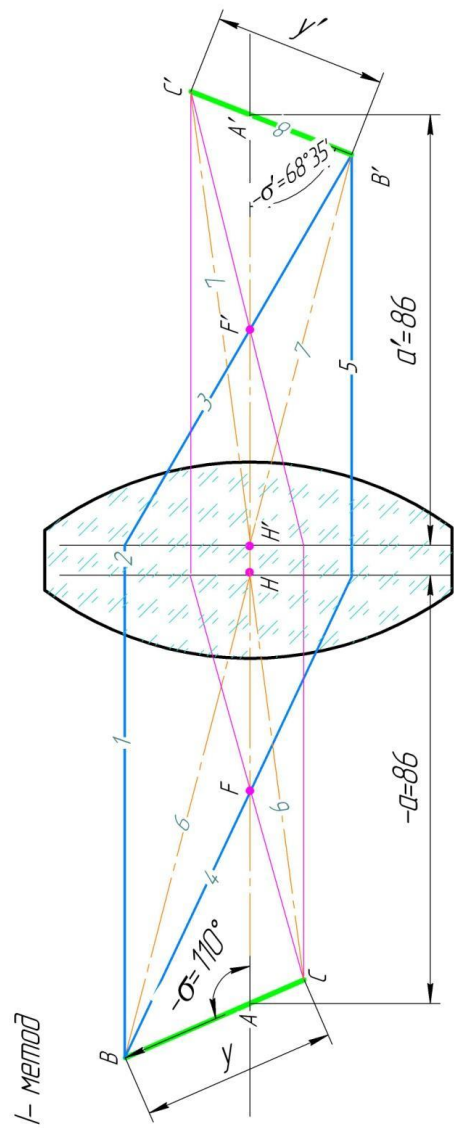


Рисунок 2.8 - Приклад побудови зображення нахилоного предмету I та II методом - розташування предмету 1

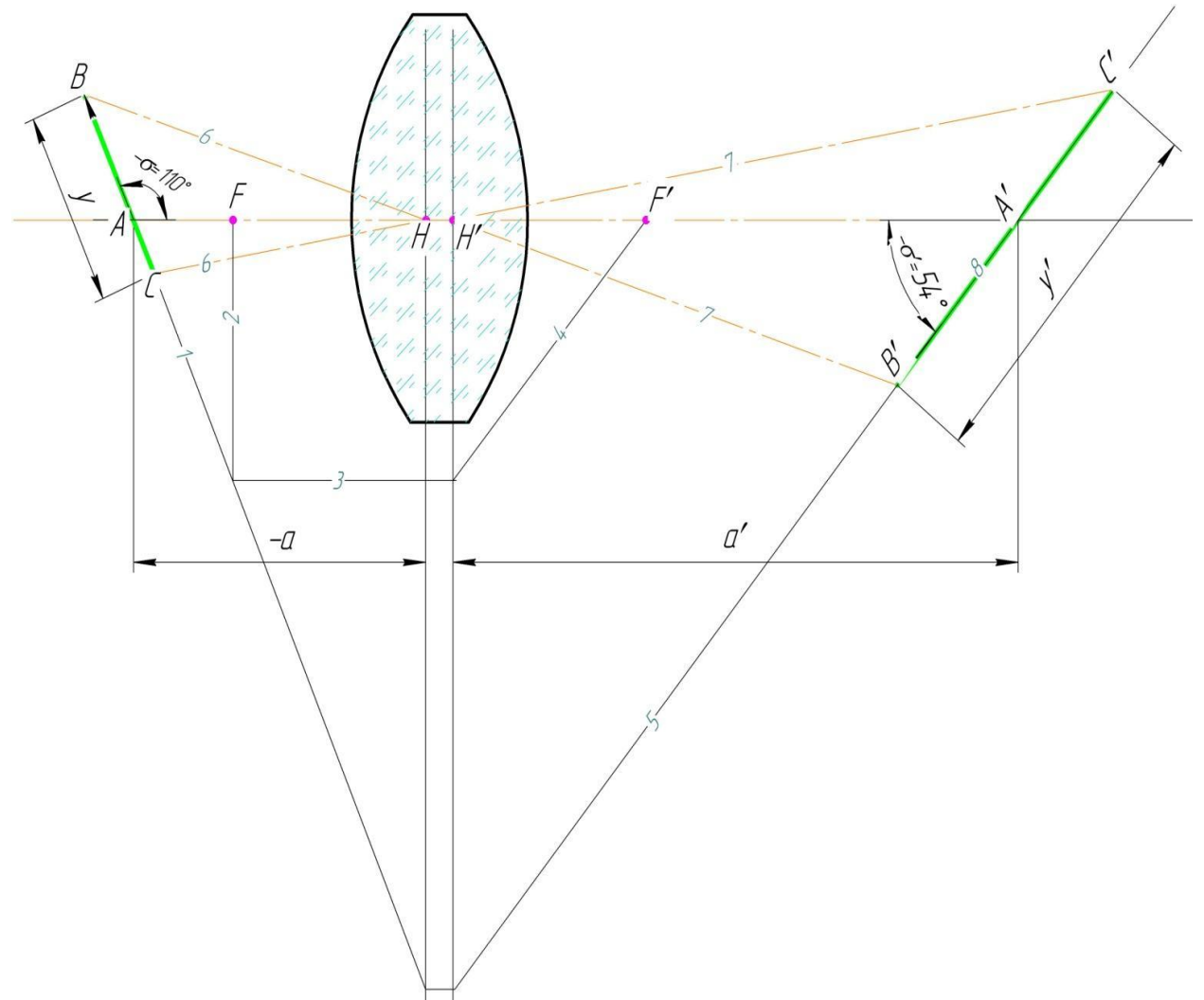
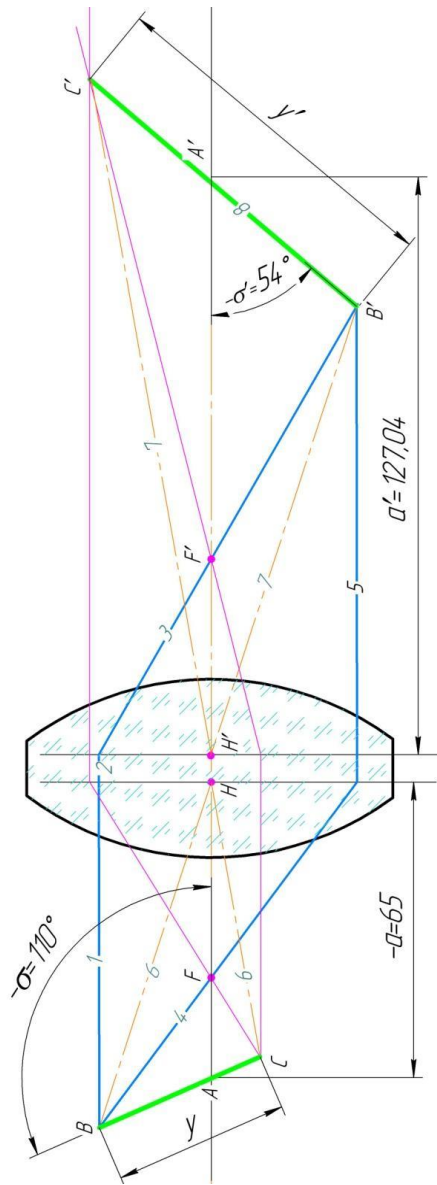


Рисунок 2.9 - Приклад побудови зображення нахилоного предмету I та II методом - розташування предмету 3

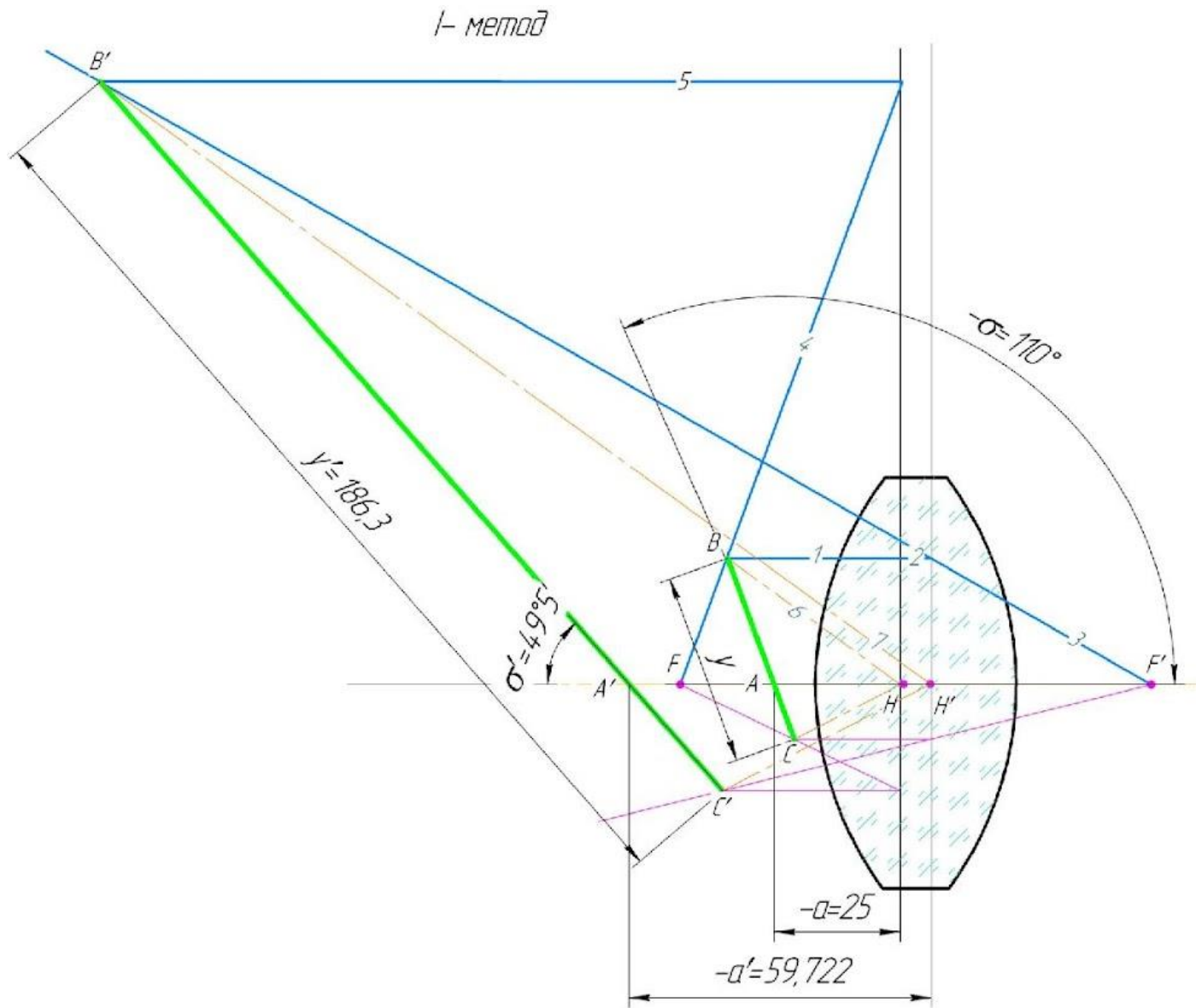


Рисунок 2.10 - Приклад побудови зображення нахиленого предмету І методом - розташування предмету 4

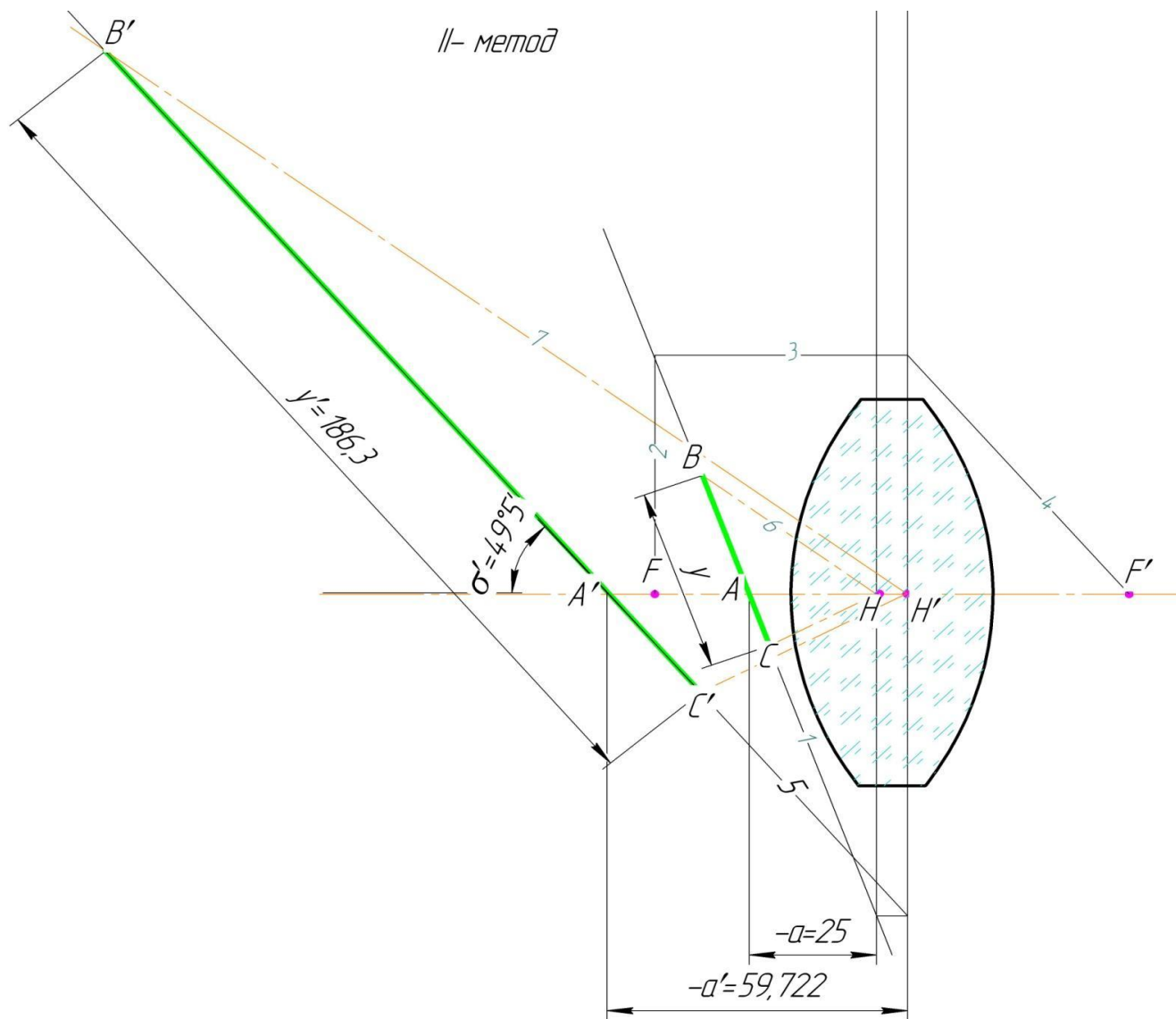


Рисунок 2.11 - Приклад побудови зображення нахиленого предмету II методом - розташування предмету 4

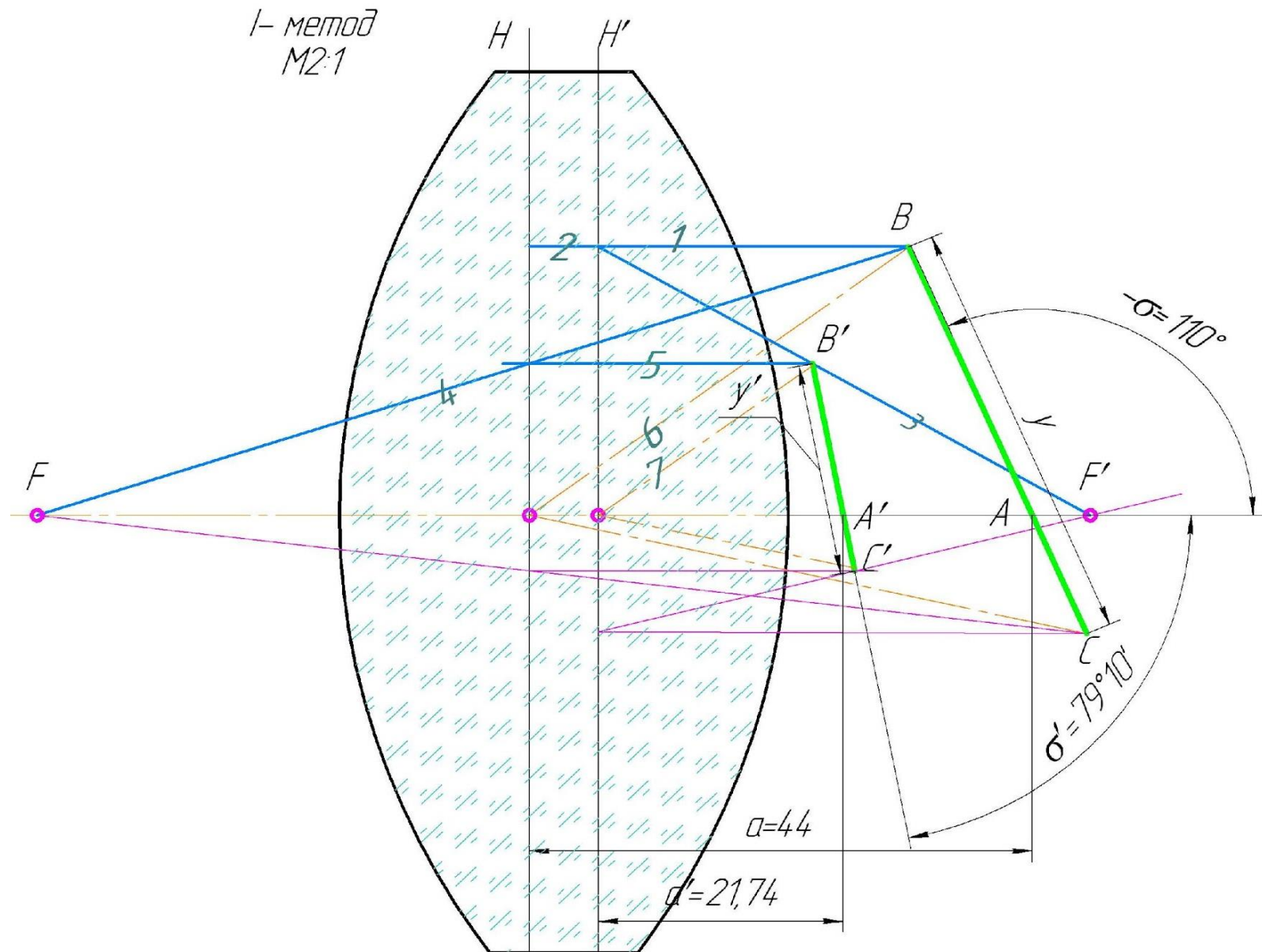


Рисунок 2.12 - Приклад побудови зображення нахилоного предмету I методом - розташування предмету 5

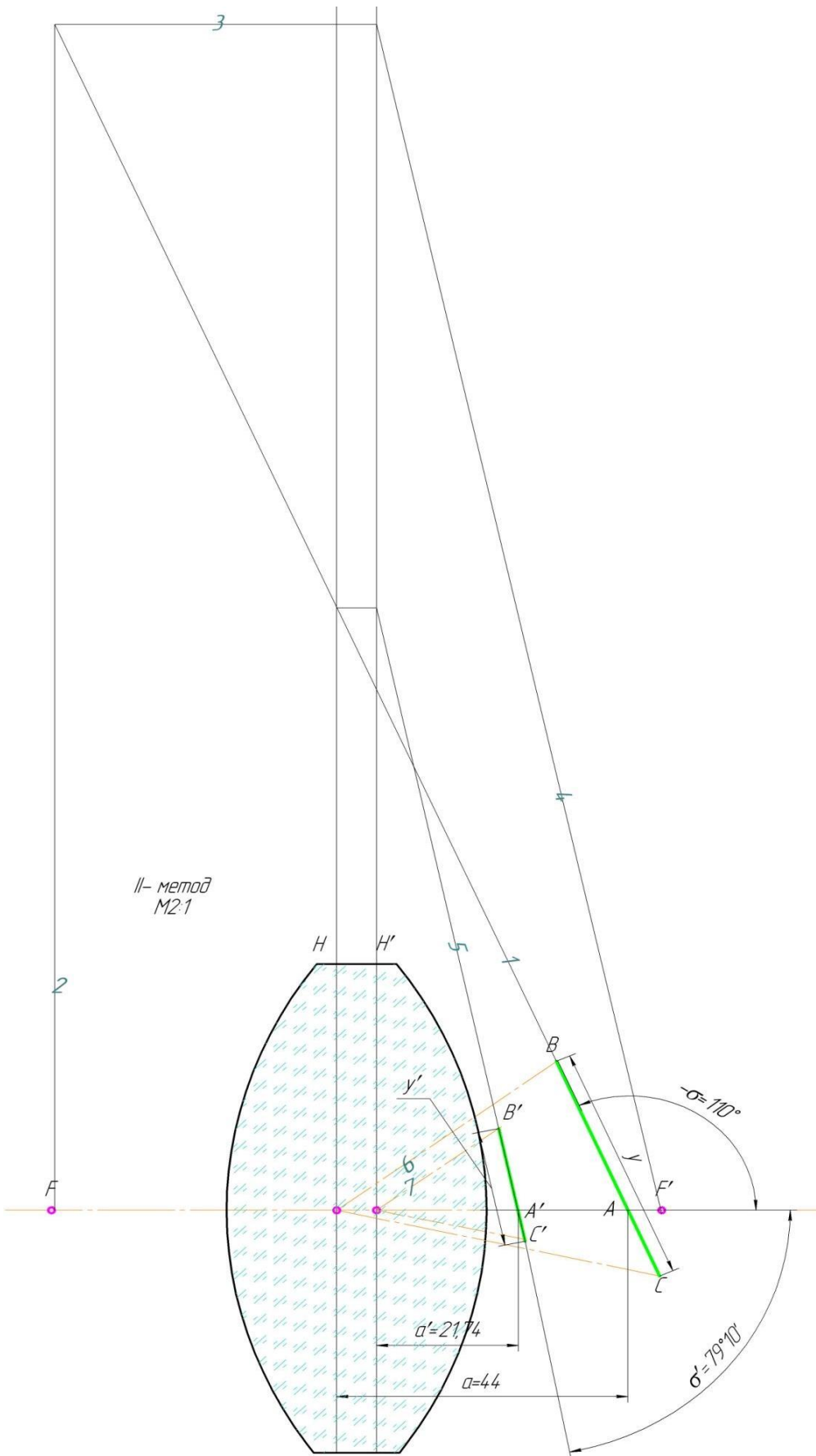


Рисунок 2.13 - Приклад побудови зображення нахилого предмету II методом - розташування предмета 5

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Поняття фокусу оптичної системи. Від чого залежить розмір зображення.
2. Яким чином можна змінювати розмір зображення предмету.
3. Показати алгоритм побудови зображення предмету для випадку $-a > f$.
4. Показати алгоритм побудови зображення предмету для випадку $-a < f$.
5. Показати алгоритм побудови зображення предмету для випадку $a < f'$
6. Показати алгоритм побудови зображення предмету для випадку $-a = 2 \cdot f$.

Література

1. Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів: навч. посібник / А. С. Литвиненко, Г. О. Петченко, О. М. Ляшенко, О. М. Діденко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 139 с.
2. Кравченко І.В. Моделювання оптико-електронних приладів: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / І. В. Кравченко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 113 с.
3. Чиж І. Г. Теорія оптичних систем : підручник / І. Г. Чиж. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 426 с.
4. Комп'ютерні методи проектування оптико-механічних систем. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спец.: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. К. Кучеренко.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. –169 с

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАКСІАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІНЗ РІЗНИХ ТИПІВ

Мета роботи

1. Ознайомитися з основними типами лінз.
2. Визначити основні параметри лінзової системи.
3. Опанувати матричний метод розрахунку оптичних систем.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Основні кардинальні точки оптичної системи.
2. Типи додатних та від'ємних лінз.
3. Побудова зображення оптичною системою.
4. Матричний метод розрахунку. Матриці типових оптичних елементів.

2. Теоретичні відомості

2.1 Параксіальні параметри лінз

Лінзою називається оптична деталь, обмежена двома заломлюючими поверхнями. Обмежимося розглядом лінз із сферичними поверхнями. В залежності від знаку задньої фокусної відстані всі лінзи можна розділити на два види:

- додатні, або збиральні, якщо $f' > 0$;
- від'ємні, або розсіювальні, якщо $f' < 0$.

Як збиральні, так і розсіювальні лінзи можна розділити на наступні чотири групи:

1. Лінзи, знаки радіусів кривизни різні. До таких лінз відносяться подвійно випуклі і подвійно-вигнуті лінзи.

2. Лінзи, що мають одну із заломлюючих поверхонь плоску ($r = \infty$). До них відносяться плоско-випуклі ($r_1 > 0; r_2 = \infty$) і плоско-вигнуті ($r_1 < 0; r_2 = \infty$).

3. Лінзи з радіусами кривизни одного знаку. Такі лінзи називають менісками. Меніски бувають додатні, у яких радіус випуклої поверхні менше по абсолютній величині радіуса вигнутої поверхні, тобто $r_1 > 0; r_2 > 0$ і $r_1 < r_2$, і від'ємні, у яких радіус випуклої поверхні більший, ніж радіус вигнутої поверхні, тобто $r_1 > 0; r_2 > 0$ і $r_1 > r_2$.

4. Концентрична лінза – лінза, у якої центри кривизни поверхонь співпадають.

Знак радіусу кривизни поверхні визначається правилом: радіус кривизни поверхні вважається додатнім, якщо її центр кривизни знаходиться з права від поверхні, а від'ємним – зліва від поверхні.

Конструктивними параметрами лінзи із сферичними поверхнями (одна із яких може бути плоскою) будуть: радіуси сфер r_1, r_2 , товщина по оптичній вісі d та показник заломлення n матеріалу лінзи. Скористаємося ними для визначення фокусних відстаней f', f лінзи, її фокальних відрізків $S'_{F'}, S_F$, положення головних площин відносно вершин сферичних поверхонь (відрізки $S'_{H'}, S_H$) та відстані $\Delta_{HH'}$ між головними площинами (головними точками).

Для простої лінзи, що розташована в повітрі, справедливими наступні співвідношення [1-3]:

$$f' = \frac{n \cdot r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}; \quad f = -\frac{n_1}{n'} \cdot f' \quad (3.1)$$

Знак фокусної відстані визначається правилом: фокусні відстані вважаються додатними по напрямку світла від головних площин.

Відношення показника заломлення середовища до відповідного фокусної відстані називається **оптичною силою системи** [1-3]:

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = \frac{(n-1)}{r_1} - \frac{(n-1)}{r_2} + \frac{(n-1)^2 \cdot d}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (3.2)$$

Передній і задній фокальний відрізки [1-3, 6]:

$$S_F = -f' \cdot \left(1 + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_2}\right); \quad S'_{F'} = f' \cdot \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1}\right) \quad (3.3)$$

Знак відрізка визначається правилом: відрізки вздовж оптичної вісі вважаються позитивними, якщо їх напрямок співпадає з позитивним напрямком розповсюдження світла, і від'ємним – при зворотному напрямку.

*Позитивним напрямком вздовж оптичної вісі вважається напрямок світла зліва направо.

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні:

$$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}; \quad S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1} \quad (3.4)$$

Для перевірки отриманих параметрів використовують формули [1-3, 6]:

$$S_H = S_F - f; \quad S'_{H'} = S'_{F'} - f' \quad (3.5)$$

Знак відрізка визначається правилом: при заломленні або відбитті променів на сферичній поверхні за начало відліку відрізка приймається вершина поверхні (точка O). Відрізки вважають додатними, якщо вони відкладаються вздовж вісі справа від точки O за напрямком розповсюдження світла, і від'ємним, коли відкладається зліва від точки O. У випадку від'ємних значень вказаних величин перед ними ставлять знак «Мінус».

Відстань між головними площинами визначається рівністю [1-3]:

$$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n}\right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\right] \quad (3.6)$$

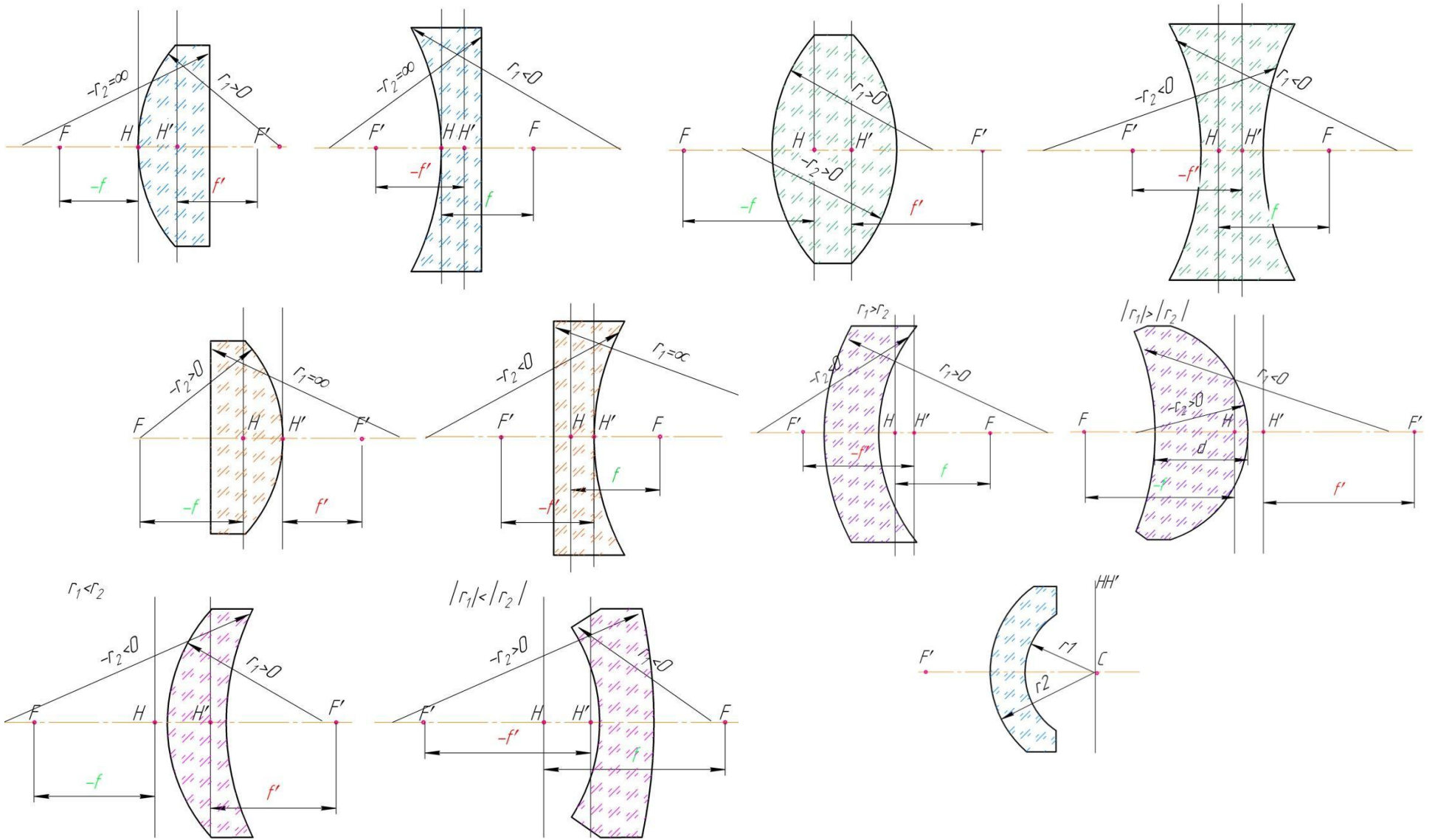
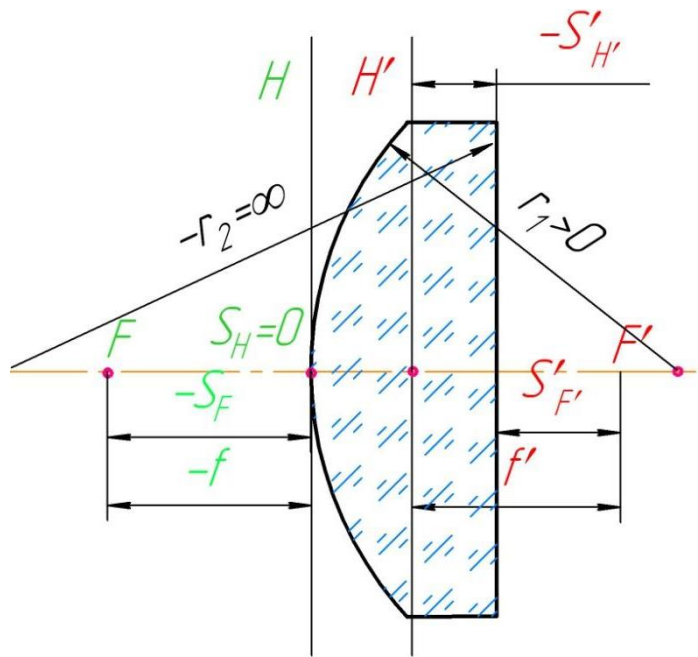


Рисунок 3.1 - Різновиди лінз [1, 3]

2.2 Матричний метод розрахунку кардинальних точок оптичної системи



1. Задаємо вихідні дані до розрахунку

Товщина лінзи	d
Показник заломлення лінзи	n
Радіуси кривизни лінзи	r_1, r_2

2. Задаємо

- Приведену товщину оптичного проміжку
- Параметри кривизни поверхні

3. Записуємо матрицю лінзи

$$M_{\text{лінзи}} = \mathfrak{R}_2 \cdot \mathfrak{T} \cdot \mathfrak{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{r_1} & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P_1 \cdot L & L \\ -(P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \cdot L) & 1 - P_2 \cdot L \end{pmatrix}$$

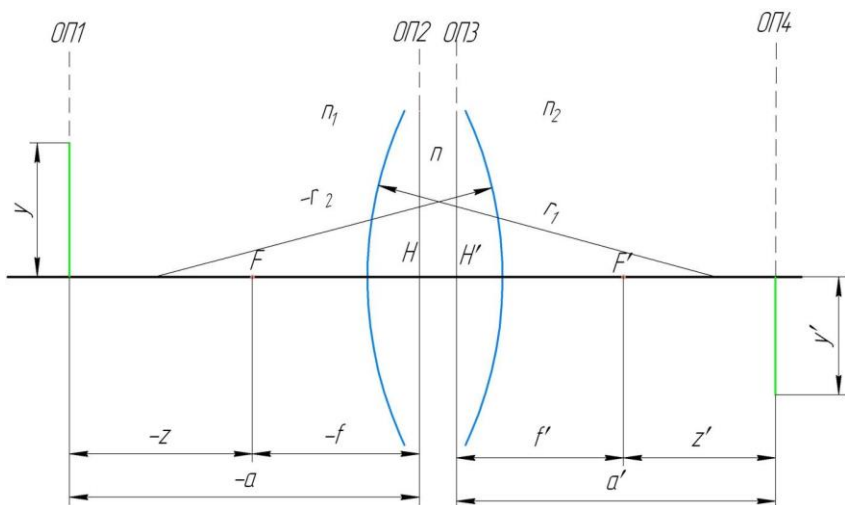
4. Розв'язуємо матрицю. Отримуємо матрицю коефіцієнтів

$$\begin{matrix} A_{\text{лінз}} & B_{\text{лінз}} \\ C_{\text{лінз}} & D_{\text{лінз}} \end{matrix}$$

5. Визначаємо:

- Передню та задню фокусну відстань лінзи $f = \frac{1}{C_{\text{лінз}}}$, $f' = -\frac{1}{C_{\text{лінз}}}$;
- Передній та задній фокальний відрізок $S_F = \frac{D_{\text{лінз}}}{C_{\text{лінз}}}$, $S_{F'} = \frac{-A_{\text{лінз}}}{C_{\text{лінз}}}$;
- Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні $S_H = \frac{D_{\text{лінз}} - 1}{C_{\text{лінз}}}$;
- Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні $S_{H'} = \frac{1 - A_{\text{лінз}}}{C_{\text{лінз}}}$;
- Відстань між головними площинами $\Delta_{HH'} = \frac{d \cdot C_{\text{лінз}} + 2 - A_{\text{лінз}} - D_{\text{лінз}}}{C_{\text{лінз}}}$

2.3 Розрахунок оптичної системи матричним методом



1. Записуємо загальну матрицю перетворення для оптичного компонента

$$M = \mathfrak{S}_1 \cdot M_H \cdot \mathfrak{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} - \text{матриця заломлення головних площин};$$

$\mathfrak{S}_2, \mathfrak{S}_1$ - матриця переносу в області зображення та предмету відповідно.

Тоді координати перетвореного променя для системи тонка лінза $\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = (\mathfrak{T}_2 \cdot M_H \cdot \mathfrak{T}_1) \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix}$

1. Розв'язавши матрицю у символічному вигляді, визначаємо відстань a_1' . Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр за допомогою функції



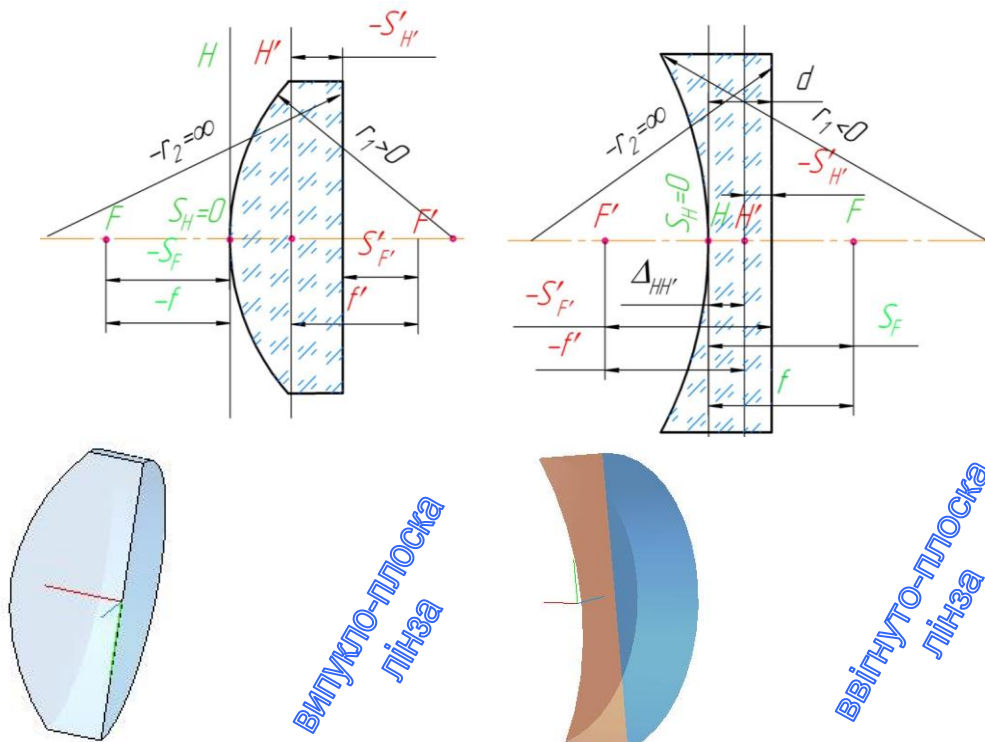
3. Задаємо вихідні дані для розрахунку. Розв'язуємо отриману матрицю

Розмір предмета	$y = 45 \text{ мм}$	* ff позначено для зручності, щоб відрізнити передню та задню фокусну відстань. Можливе будь-яке інше зручне для Вас позначення
Задня фокусна відстань оптичного компонента	$ff, \text{мм}$	
Апертурний кут променю	$-\sigma = 20^\circ$	
Відстань від предмету до оптичного компонента	$-a = k \cdot f' \text{ мм}, a = k \cdot f', \text{мм}$	



Приклад 3.1 Визначення параксіальних параметрів лінз різних типів

Розрахувати основні параметри випукло-пласкої та ввігнуто-пласкої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані, $-a = k \cdot f'$, мм та $a = k \cdot f'$, мм відповідно.



Розрахункові формули	$r_1 = 10 \text{ мм}$	$r_1 = -10 \text{ мм}$
$f' = \frac{r_1}{(n-1)}$	16,949 мм	-16,949 мм
$f = -f'$	-16,949 мм	16,949 мм
S_H	0	0
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$-16.94 - (-16.94) = 0$	$16.94 - 16.94 = 0$
$S'_{H'} = -\frac{d}{n}$	-1,258	-1,258 мм
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$15.691 - 16.949 = -1.258 \text{ мм}$	$-18.207 - (-16.949) = -1.258 \text{ мм}$
$S_{F'} = -f$	-16,94 мм	16,94 мм
$S'_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	15,691 мм	-18,207 мм
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$	0,742 мм	0,742 мм
Розташування предмету $k = 2.15$	$-a = k \cdot f'$, мм;	$a = k \cdot f'$, мм
y , мм	46	
n	1,59	

Розрахнок кардинальних точок оптичної системи матричним методом

Вихідні дані до розрахунку

товщина лінзи

$$d := 2$$

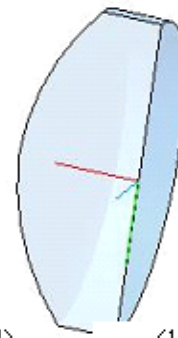
показник заломлення лінзи

$$n := 1.59$$

радіуси кривизни лінзи

$$r1 := 10$$

$$r2 := 1000000$$



Задаємо:

- приведену товщину оптичного проміdkу

$$L := \frac{d}{n}$$

- параметри кривизни поверхні

$$P1 := \frac{(n-1)}{r1}$$

$$P2 := \frac{(1-n)}{r2}$$

Записуємо матрицю лінзи $M = \mathcal{R}_2 \cdot \mathcal{S} \cdot \mathcal{R}_1 =$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{r1} & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P1 \cdot L & L \\ -(P1 + P2 - P1 \cdot P2 \cdot L) & 1 - P2 \cdot L \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - P1 \cdot L & L \\ [-(P1 + P2 - P1 \cdot P2 \cdot L)] & 1 - P2 \cdot L \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.926 & 1.258 \\ -0.059 & 1 \end{pmatrix}$$

Передня фокусна відстань лінзи

$$f := \frac{1}{C_{linz}}$$

$$f = -16.949$$

Задня фокусна відстань лінзи

$$ff := \frac{-1}{C_{linz}}$$

$$ff = 16.949$$

Передній фокальний відрізок

$$S_F \quad SF := \frac{D_{linz}}{C_{linz}}$$

$$SF = -16.949$$

Задній фокальний відрізок

$$S'_F \quad SFF := \frac{-A_{linz}}{C_{linz}}$$

$$SFF = 15.691$$

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні

$$S_H \quad SH := \frac{D_{linz} - 1}{C_{linz}}$$

$$SH = -1.258 \times 10^{-5}$$

Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні

$$S'_H \quad SHH := \frac{1 - A_{linz}}{C_{linz}}$$

$$SHH = -1.258$$

Відстань між головними площинами

$$\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H$$

$$\Delta_{HH'} = \frac{(d \cdot C_{linz} + 2 - A_{linz} - D_{linz})}{C_{linz}}$$

$$\Delta_{HH'} = 0.742$$

Утворення зображення в оптичній системі

Дано:

- розмір предмету

- апертурний кут променя

відстань від предмету до оптичного компоненту

$$y := 46$$

$$\sigma := -20$$

$$k := 2.15$$

$$a := -k \cdot ff$$

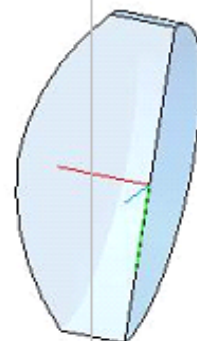
$$a = -36.441$$

$$-a = k \cdot f' \text{ мм}$$

Задаємо

- кутова координата

$$v := (\sigma \cdot n) \quad v = -31.8$$



Записуємо матрицю утворення зображення в оптичній системі

$$M_1 = \mathfrak{S}_1 \cdot M_{\text{линза}} \cdot \mathfrak{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

*примітка. Для виконання розрахунку матриці в символному вигляді позначаємо параметри, що входять до матриці великими літерами

$$\begin{pmatrix} 1 & AA \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/FF & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{AA}{FF} & -\left(1 - \frac{AA}{FF}\right) \cdot A + AA \\ \frac{-1}{FF} & \frac{1}{FF} \cdot A + 1 \end{bmatrix}$$

Відстань від оптичного компоненту до зображення

$$A := a \quad FF := ff \quad FF = 16.949$$

$$aa := \frac{A}{(A + FF)} \cdot FF \quad aa = 31.688$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa}{ff} & -\left(1 - \frac{aa}{ff}\right) \cdot a + aa \\ \frac{-1}{ff} & \frac{1}{ff} \cdot a + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.87 & 3.553 \times 10^{-15} \\ -0.059 & -1.15 \end{pmatrix}$$

Відстань від фокусу до предмету

$$z := D \cdot ff \quad z = -19.492$$

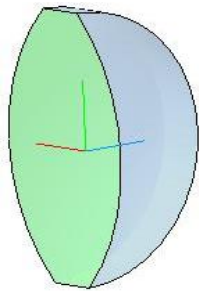
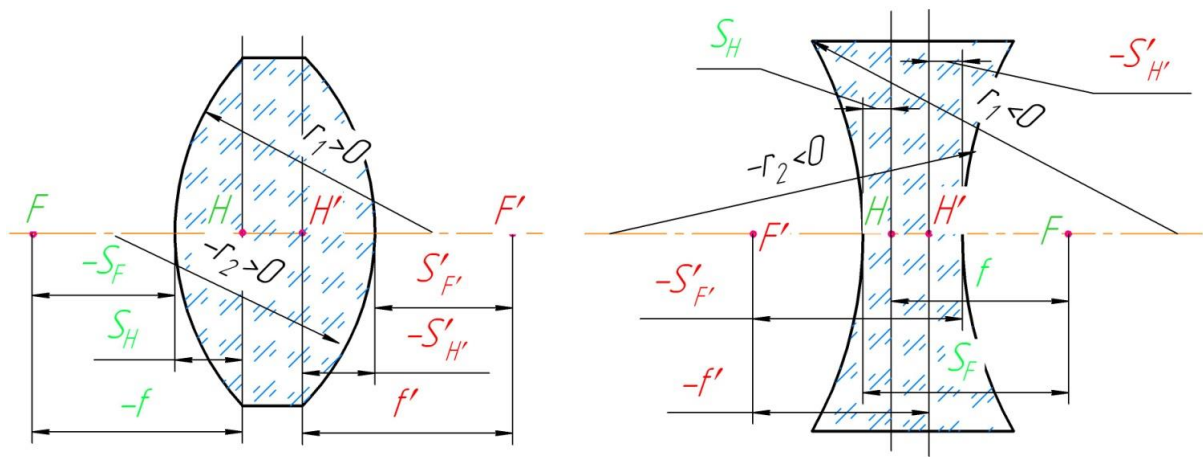
Відстань від фокусу до зображення

$$zz := -A \cdot ff \quad zz = 14.739$$

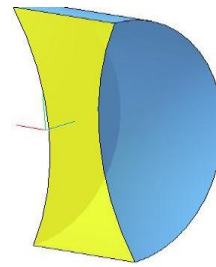
Розмір зображення і апертурний кут в області зображення

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ v \\ - \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -40 \\ 20.286 \end{pmatrix}$$

+



ПОДВІЙНО-ВИГУМЛА
ЛІНЗА



ПОДВІЙНО-ВВИГНУТА
ЛІНЗА

Розрахункові формули	$r_1=10 \text{ мм}; r_2=-10 \text{ мм}$	$r_1=-10 \text{ мм}; r_2=10 \text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	8,8 мм	-8,171 мм
$f = -f'$	-8,8 мм	8,171 мм
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	0,653 мм	0,606 мм
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$-8,148 - (-8,8) = 0,652 \text{ мм}$	$8,778 - 8,171 = 0,607 \text{ мм}$
$S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	-0,653 мм	-0,606 мм
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$8,148 - 8,8 = -0,652 \text{ мм}$	$-8,778 - (-8,171) = -0,607 \text{ мм}$
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-8,148 мм	8,778 мм
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	8,148 мм	-8,778 мм
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0,694 мм	0,787 мм
Розташування предмету $k = 2$	$-a = k \cdot f', \text{ мм};$	$a = k \cdot f', \text{ мм}$
$y, \text{ мм}$	46	
n	1,59	

Розрахнок кардинальних точок оптичної системи матричним методом

Вихідні дані до розрахунку

товщина лінзи

$$d := 2$$

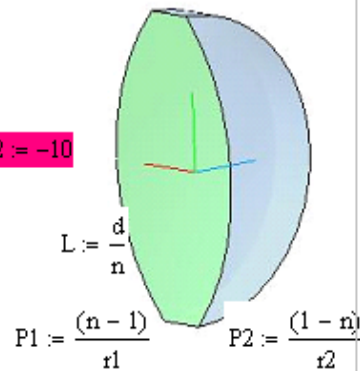
показник заломлення лінзи

$$n := 1.59$$

радіуси кривизни лінзи

$$r1 := 10$$

$$r2 := -10$$



Задаємо:

- приведену товщину оптичного проміжку

$$L := \frac{d}{n}$$

- параметри кривизни поверхні

$$P1 := \frac{(n-1)}{r1} \quad P2 := \frac{(1-n)}{r2}$$

Записуємо матрицю лінзи $M = \mathcal{R}_2 \cdot \mathcal{S} \cdot \mathcal{R}_1 =$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{r_1} & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P_1 \cdot L & L \\ -(P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \cdot L) & 1 - P_2 \cdot L \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - P_1 \cdot L & L \\ [-(P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \cdot L)] & 1 - P_2 \cdot L \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.926 & 1.258 \\ -0.114 & 0.926 \end{pmatrix}$$

Передня фокусна відстань лінзи

$$f := \frac{1}{C_{linz}} \quad f = -8.801$$

Задня фокусна відстань лінзи

$$ff := \frac{-1}{C_{linz}} \quad ff = 8.801$$

Передній фокальний відрізок

$$S_F \quad SF := \frac{D_{linz}}{C_{linz}} \quad SF = -8.148$$

Задній фокальний відрізок

$$S'_F \quad SFF := \frac{-A_{linz}}{C_{linz}} \quad SFF = 8.148$$

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні

$$S_H \quad SH := \frac{D_{linz} - 1}{C_{linz}} \quad SH = 0.653$$

Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні

$$S'_H \quad SHH := \frac{1 - A_{linz}}{C_{linz}} \quad SHH = -0.653$$

Відстань між головними площинами

$$\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H$$

$$\Delta_{HH} := \frac{(d \cdot C_{linz} + 2 - A_{linz} - D_{linz})}{C_{linz}} \quad \Delta_{HH} = 0.694$$

Утворення зображення в оптичній системі

Дано:

- розмір предмету

- апертурний кут променя

відстань від предмету до оптичного компоненту

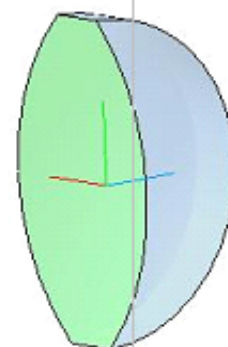
$$y := 46$$

$$\sigma := -20$$

$$k := 2$$

$$a := -k \cdot ff$$

$$a = -17.602$$



Задаємо

- кутова координата

$$-a = k \cdot f' \text{ мм}$$

$$v := (\sigma \cdot n)$$

$$v = -31.8$$

Записуємо матрицю утворення зображення в оптичній системі

$$M_1 = \mathfrak{S}_1 \cdot M_{\text{линзи}} \cdot \mathfrak{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

*примітка. Для виконання розрахунку матриці в символічному вигляді позначаємо параметри, що входять до матриці великими літерами

$$\begin{pmatrix} 1 & AA \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{AA}{FF} & -\left(1 - \frac{AA}{FF}\right) \cdot A + AA \\ -\frac{1}{FF} & \frac{1}{FF} \cdot A + 1 \end{bmatrix}$$

Відстань від оптичного компоненту до зображення

$$aa := \frac{a}{(a + ff)} \cdot ff$$

$$aa = 17.602$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa}{ff} & -\left(1 - \frac{aa}{ff}\right) \cdot a + aa \\ -\frac{1}{ff} & \frac{1}{ff} \cdot a + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -0.11362 & -1 \end{pmatrix}$$

Відстань від фокусу до предмету

$$z := D \cdot ff$$

$$z = -8.801$$

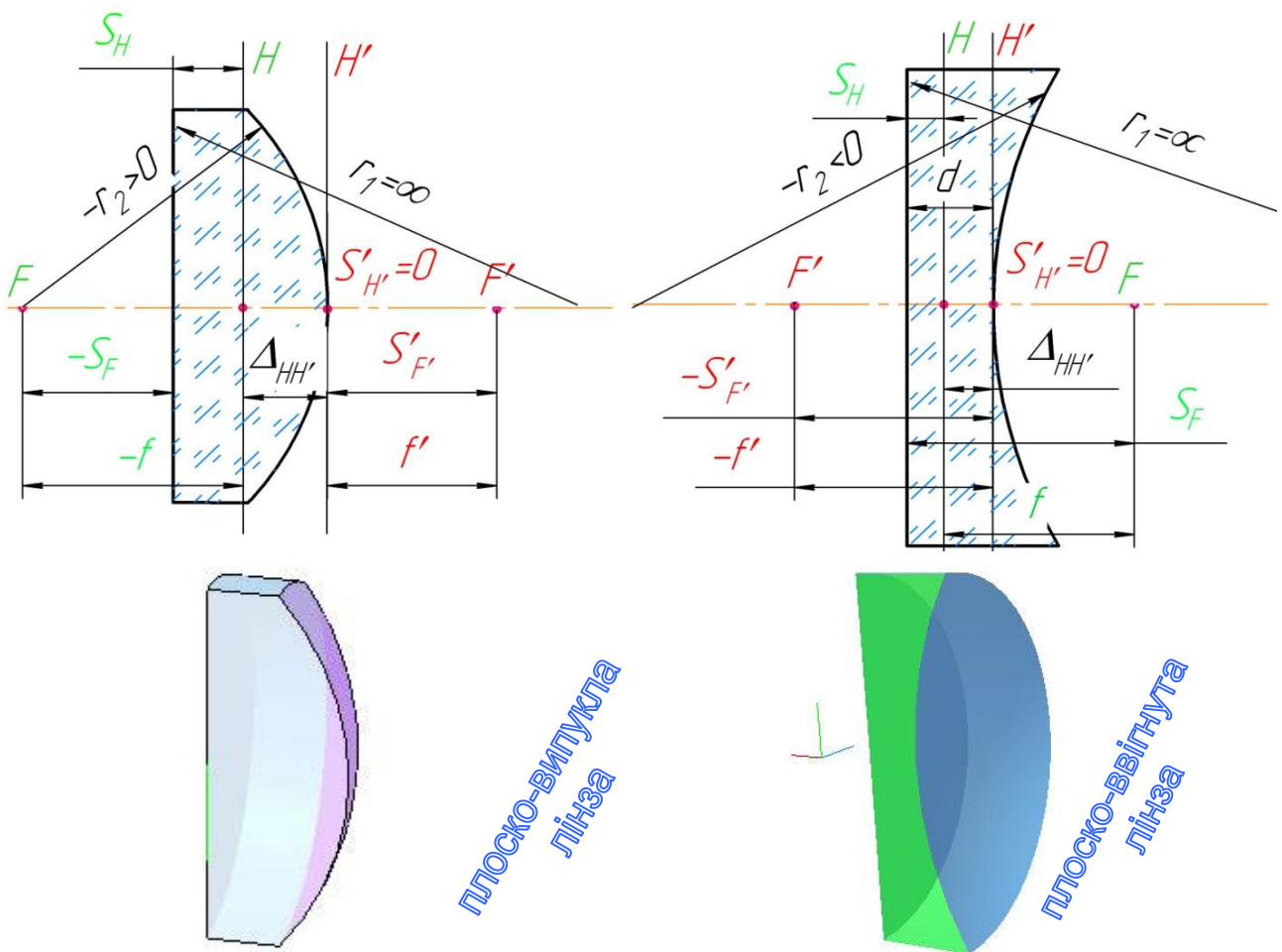
Відстань від фокусу до зображення

$$zz := -A \cdot ff$$

$$zz = 8.801$$

Розмір зображення і апертурний кут в області зображення

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ v \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -46 \\ 14.773 \end{pmatrix}$$



Розрахункові формули	$r_2 = -10$ мм	$r_2 = 10$ мм
$f' = \frac{-r_2}{(n-1)}$	16,949 мм	-16,949 мм
$f = -f'$	-16,949 мм	16,949 мм
$S'_{H'}$	0	0
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$16.949 - 16.949 = 0$	$-16.94 - (-16.94) = 0$
$S_H = \frac{d}{n}$	1,258	1,258 мм
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$-15.691 - (-16.949) = 1.258$ мм	$18.207 - 16.949 = 1.258$ мм
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-15,691 мм	18,207 мм
$S'_{F'} = f'$	16,949 мм	-16,949 мм
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$	0,742 мм	0,742 мм
Розташування предмету $k = 1.51$	$-a = k \cdot f'$, мм;	$a = k \cdot f'$, мм
y , мм	46	
n	1,59	

Розрахнок кардинальних точок оптичної системи матричним методом

Вихідні дані до розрахунку

товщина лінзи

$$d := 2$$

показник заломлення лінзи

$$n := 1.59$$

радіуси кривизни лінзи

$$r1 := 1000000 \quad r2 := -10$$



Задаємо:

- приведену товщину оптичного проміжку

$$L := \frac{d}{n}$$

- параметри кривизни поверхні

$$P1 := \frac{(n-1)}{r1} \quad P2 := \frac{(1-n)}{r2}$$

Записуємо матрицю лінзи $M = \mathcal{R}_2 \cdot \mathcal{S} \cdot \mathcal{R}_1 =$

$$\begin{aligned} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{r_1} & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P_1 \cdot L & L \\ -(P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \cdot L) & 1 - P_2 \cdot L \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - P1 \cdot L & L \\ [-(P1 + P2 - P1 \cdot P2 \cdot L)] & 1 - P2 \cdot L \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1.258 \\ -0.059 & 0.926 \end{pmatrix}$$

Передня фокусна відстань лінзи

$$f := \frac{1}{C_{linz}} \quad f = -16.949$$

Задня фокусна відстань лінзи

$$ff := \frac{-1}{C_{linz}} \quad ff = 16.949$$

Передній фокальний відрізок

$$S_F \quad SF := \frac{D_{linz}}{C_{linz}} \quad SF = -15.691$$

Задній фокальний відрізок

$$S'_F \quad SFF := \frac{-A_{linz}}{C_{linz}} \quad SFF = 16.949$$

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні

$$S_H \quad SH := \frac{D_{linz} - 1}{C_{linz}} \quad SH = 1.258$$

Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні

$$S'_H \quad SHH := \frac{1 - A_{linz}}{C_{linz}} \quad SHH = -1.258 \times 10^{-5}$$

Відстань між головними площинами

$$\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H$$

$$\Delta_{HH'} = \frac{(d \cdot C_{linz} + 2 - A_{linz} - D_{linz})}{C_{linz}} \quad \Delta_{HH'} = 0.742$$

Утворення зображення в оптичній системі

Дано:

- розмір предмету

$$y := 46$$

-апертурний кут променя

$$\sigma := -20$$

відстань від предмету до оптичного компоненту

$$k := 1.51$$

$$-a = k \cdot f' \text{ мм}$$

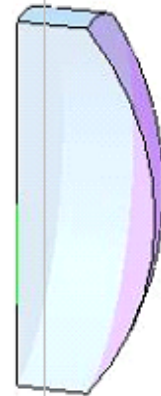
$$a := -k \cdot ff$$

$$a = -25.593$$

Задаємо

- кутова координата

$$v := (\sigma \cdot n) \quad v = -31.8$$



Записуємо матрицю утворення зображення в оптичній системі

$$M_1 = \mathfrak{S}_1 \cdot M_{\text{линзи}} \cdot \mathfrak{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

*примітка. Для виконання розрахунку матриці в символному вигляді позначаємо параметри, що входять до матриці великими літерами

$$\begin{pmatrix} 1 & AA \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/FF & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{AA}{FF} & -\left(1 - \frac{AA}{FF}\right) \cdot A + AA \\ -\frac{1}{FF} & \frac{1}{FF} \cdot A + 1 \end{bmatrix}$$

Відстань від оптичного компоненту до зображення

$$aa := \frac{a}{(a + ff)} \cdot ff$$

$$aa = 50.182$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa}{ff} & -\left(1 - \frac{aa}{ff}\right) \cdot a + aa \\ -\frac{1}{ff} & \frac{1}{ff} \cdot a + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.96078 & 0 \\ -0.059 & -0.51 \end{pmatrix}$$

Відстань від фокусу до предмету

$$z := D \cdot ff$$

$$z = -8.644$$

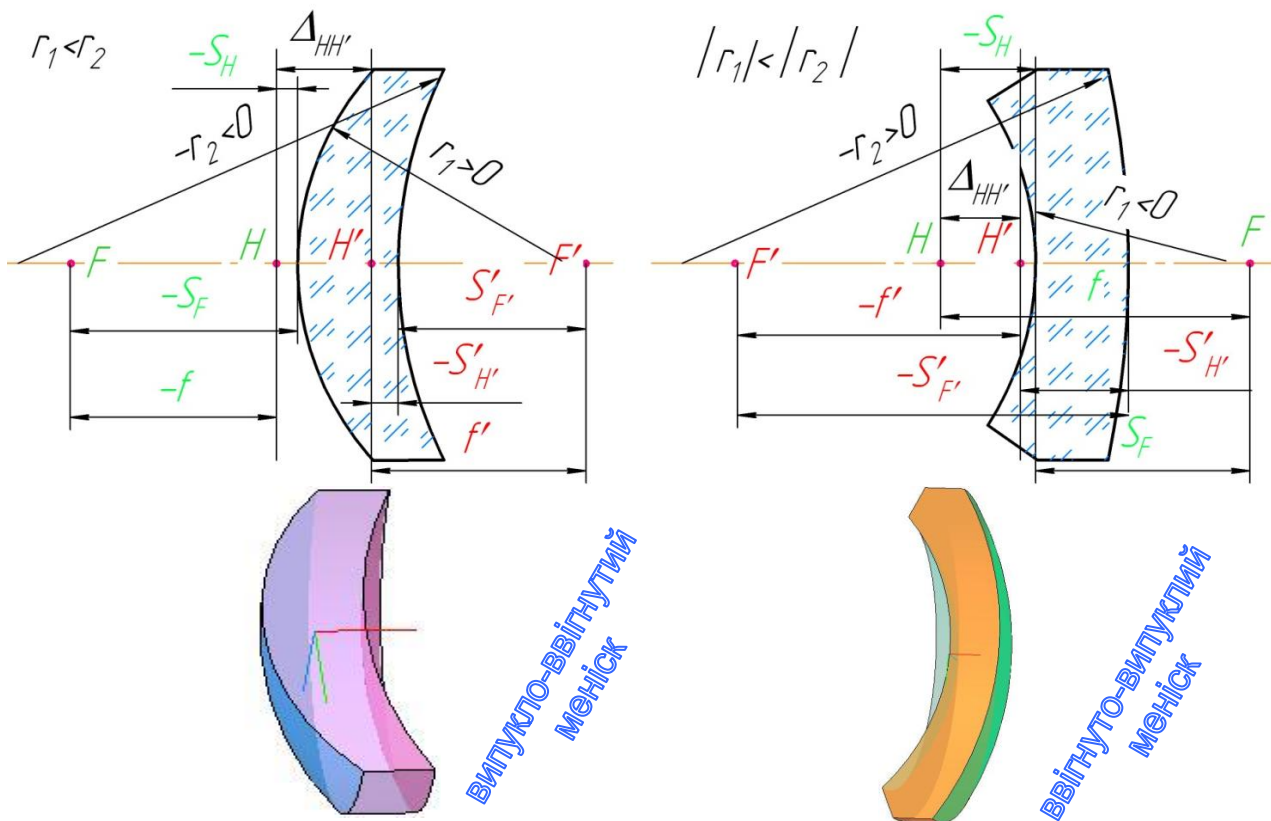
Відстань від фокусу до зображення

$$zz := -A \cdot ff$$

$$zz = 33.233$$

Розмір зображення і апертурний кут в області зображення

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ \left(\frac{v}{n}\right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -90.196 \\ 7.486 \end{pmatrix}$$



Розрахункові формули	$r_1 = 10 \text{ мм}; r_2 = 20 \text{ мм}$	$r_1 = -10 \text{ мм}; r_2 = -20 \text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	31,556 мм	-36,616 мм
$f = -f'$	-31,556 мм	36,616
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	-1,171 мм	-1,359
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$-32.727 - (-31.556) = -1.171 \text{ мм}$	$35.257 - 36.616 = -1.359 \text{ мм}$
$S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	-2,342 мм	-2,717
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$29.214 - 31.556 = -2.342 \text{ мм}$	$-39.333 - (-36.616) = -2.717 \text{ мм}$
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-32,727 мм	35,257
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	+29,214 мм	-39,333
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0,829 мм	0,641 мм
Розташування предмету $k = 0.55$	$-a = k \cdot f', \text{ мм};$	$a = k \cdot f', \text{ мм}$
$y, \text{ мм}$	46	
n	1,59	

Розрахнок кардинальних точок оптичної системи матричним методом

Вихідні дані до розрахунку

товщина лінзи

$$d := 2$$

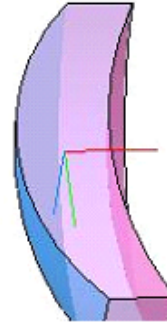
показник заломлення лінзи

$$n := 1.59$$

радіуси кривизни лінзи

$$r1 := 10$$

$$r2 := 20$$



Задаємо:

- приведену товщину оптичного проміжку

$$L := \frac{d}{n}$$

- параметри кривизни поверхні

$$P1 := \frac{(n-1)}{r1}$$

$$P2 := \frac{(1-n)}{r2}$$

Записуємо матрицю лінзи $M = \mathcal{R}_2 \cdot \mathcal{S} \cdot \mathcal{R}_1 =$

$$\begin{aligned} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{r_1} & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P_1 \cdot L & L \\ -(P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \cdot L) & 1 - P_2 \cdot L \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} A_{\text{linz}} & B_{\text{linz}} \\ C_{\text{linz}} & D_{\text{linz}} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - P1 \cdot L & L \\ [-(P1 + P2 - P1 \cdot P2 \cdot L)] & 1 - P2 \cdot L \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{\text{linz}} & B_{\text{linz}} \\ C_{\text{linz}} & D_{\text{linz}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.926 & 1.258 \\ -0.032 & 1.037 \end{pmatrix}$$

Передня фокусна відстань лінзи

$$f := \frac{1}{C_{\text{linz}}} \quad f = -31.556$$

Задня фокусна відстань лінзи

$$ff := \frac{-1}{C_{\text{linz}}} \quad ff = 31.556$$

Передній фокальний відрізок

$$S_F \quad SF := \frac{D_{\text{linz}}}{C_{\text{linz}}} \quad SF = -32.727$$

Задній фокальний відрізок

$$S'_F \quad SFF := \frac{-A_{\text{linz}}}{C_{\text{linz}}} \quad SFF = 29.214$$

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні

$$S_H \quad SH := \frac{D_{\text{linz}} - 1}{C_{\text{linz}}} \quad SH = -1.171$$

Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні

$$S'_H \quad SHH := \frac{1 - A_{\text{linz}}}{C_{\text{linz}}} \quad SHH = -2.342$$

Відстань між головними площинами

$$\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H$$

$$\Delta_{HH'} := \frac{(d \cdot C_{\text{linz}} + 2 - A_{\text{linz}} - D_{\text{linz}})}{C_{\text{linz}}} \quad \Delta_{HH'} = 0.829$$

Утворення зображення в оптичній системі

Дано:

- розмір предмету

- апертурний кут променя

відстань від предмету до оптичного компоненту

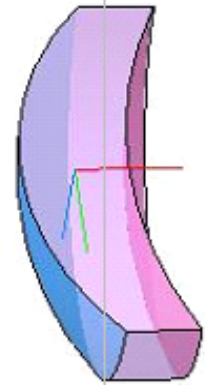
$$y := \dots$$

$$\sigma := \dots$$

$$k := 0.55$$

$$a := -k \cdot f$$

$$a = -17.$$



$$-a = k \cdot f' \text{ мм}$$

Задаємо

- кутова координата

$$v := (\sigma \cdot n)$$

$$v = -31.8$$

Записуємо матрицю утворення зображення в оптичній системі

$$M_1 = \mathfrak{S}_1 \cdot M_{\text{линза}} \cdot \mathfrak{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

*примітка. Для виконання розрахунку матриці в символічному вигляді позначаємо параметри, що входять до матриці великими літерами

$$\begin{pmatrix} 1 & AA \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/FF & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{AA}{FF} & -\left(1 - \frac{AA}{FF}\right) \cdot A + AA \\ -\frac{1}{FF} & \frac{1}{FF} \cdot A + 1 \end{bmatrix}$$

Відстань від оптичного компоненту до зображення

$$aa := \frac{a}{(a + ff)} \cdot ff$$

$$aa = -38.569$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa}{ff} & -\left(1 - \frac{aa}{ff}\right) \cdot a + aa \\ -\frac{1}{ff} & \frac{1}{ff} \cdot a + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.22222 & 0 \\ -0.03169 & 0.45 \end{pmatrix}$$

Відстань від фокусу до предмету

$$z := D \cdot ff$$

$$z = 14.2$$

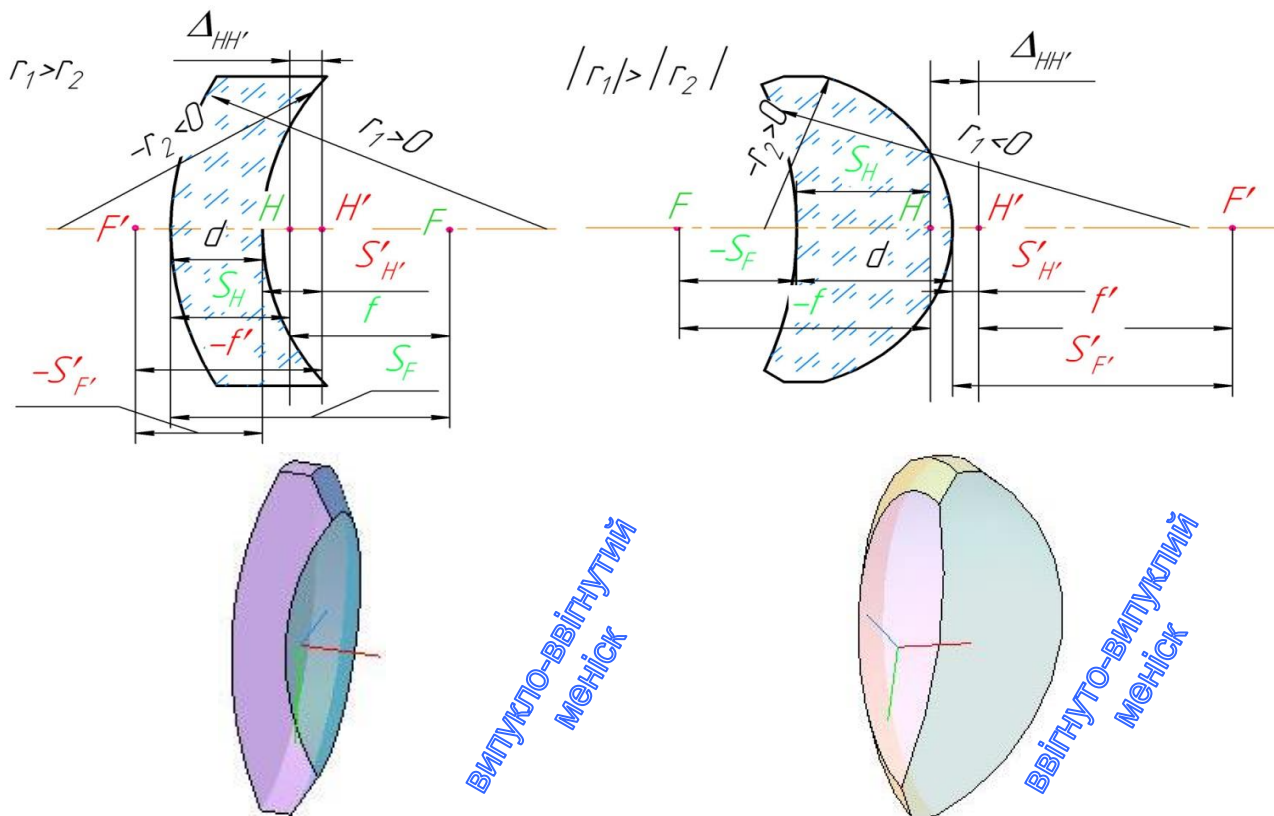
Відстань від фокусу до зображення

$$zz := -A \cdot ff$$

$$zz = -70.125$$

Розмір зображення і апертурний кут в області зображення

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ \frac{v}{n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 102.222 \\ -10.458 \end{pmatrix}$$



Розрахункові формули	$r_1 = 20 \text{ мм}; r_2 = 10 \text{ мм}$	$r_1 = -20 \text{ мм}; r_2 = -10 \text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	-36,616 мм	31,556 мм
$f = -f'$	36,616 мм	-31,556 мм
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	2,717 мм	2,342 мм
$S_H = S_F - f$ - перевірка	39,333 - 36,616 = 2,717 мм	-29,214 - (-31,556) = 2,342 мм
$S_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	1,359 мм	1,171 мм
$S_{H'} = S_{F'} - f'$ - перевірка	-35,257 - (-36,616) = 1,359 мм	32,727 - 31,556 = 1,171 мм
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	39,333 мм	-29,214 мм
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-35,257 мм	32,727 мм
$\Delta_{HH'} = d + S_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0,641 мм	0,829 мм
Розташування предмету $k = 0.55$	$-a = k \cdot f'$, мм	$a = k \cdot f'$, мм
y , мм	46	
n	1,59	

Розрахнок кардинальних точок оптичної системи матричним методом

Вихідні дані до розрахунку

товщина лінзи

$$d := 2$$

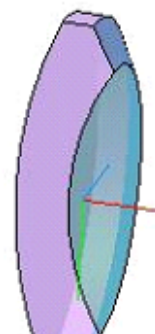
показник заломлення лінзи

$$n := 1.59$$

радіуси кривизни лінзи

$$r1 := 20$$

$$r2 := 10$$



Задаємо:

- приведену товщину оптичного проміжку

$$L := \frac{d}{n}$$

- параметри кривизни поверхні

$$P1 := \frac{(n-1)}{r1}$$

$$P2 := \frac{(1-n)}{r2}$$

Записуємо матрицю лінзи $M = \mathcal{R}_2 \cdot \mathcal{T} \cdot \mathcal{R}_1 =$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{r_1} & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P_1 \cdot L & L \\ -(P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \cdot L) & 1 - P_2 \cdot L \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - P1 \cdot L & L \\ [-(P1 + P2 - P1 \cdot P2 \cdot L)] & 1 - P2 \cdot L \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.963 & 1.258 \\ 0.027 & 1.074 \end{pmatrix}$$

Передня фокусна відстань лінзи

$$f := \frac{1}{C_{linz}} \quad f = 36.616$$

Задня фокусна відстань лінзи

$$ff := \frac{-1}{C_{linz}} \quad ff = -36.616$$

Передній фокальний відрізок

$$S_F \quad SF := \frac{D_{linz}}{C_{linz}} \quad SF = 39.333$$

Задній фокальний відрізок

$$S'_F \quad SFF := \frac{-A_{linz}}{C_{linz}} \quad SFF = -35.257$$

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні

$$S_H \quad SH := \frac{D_{linz} - 1}{C_{linz}} \quad SH = 2.717$$

Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні

$$S'_H \quad SHH := \frac{1 - A_{linz}}{C_{linz}} \quad SHH = 1.339$$

Відстань між головними площинами

$$\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H$$

$$\Delta_{HH'} := \frac{(d \cdot C_{linz} + 2 - A_{linz} - D_{linz})}{C_{linz}} \quad \Delta_{HH'} = 0.641$$

Утворення зображення в оптичній системі

Дано:

- розмір предмету

$$y := 46$$

-апертурний кут променя

$$\sigma := -20$$

відстань від предмету до оптичного компоненту

$$k := 0.55$$

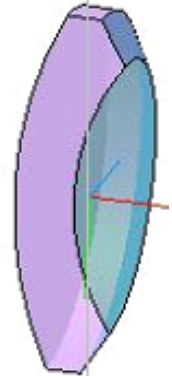
$$-a = k \cdot f' \text{ мм} \quad a := -k \cdot ff$$

$$a = 20.139$$

Задаємо

- кутова координата

$$v := (\sigma \cdot n) \quad v = -31.8$$



Записуємо матрицю утворення зображення в оптичній системі

$$M_1 = \mathfrak{S}_1 \cdot M_{\text{линза}} \cdot \mathfrak{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

*примітка. Для виконання розрахунку матриці в символному вигляді позначаємо параметри, що входять до матриці великими літерами

$$\begin{pmatrix} 1 & AA \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/FF & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{AA}{FF} & -\left(1 - \frac{AA}{FF}\right) \cdot A + AA \\ -\frac{1}{FF} & \frac{1}{FF} \cdot A + 1 \end{bmatrix}$$

Відстань від оптичного компоненту до зображення

$$aa := \frac{a}{(a + ff)} \cdot ff$$

$$aa = 44.753$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa}{ff} & -\left(1 - \frac{aa}{ff}\right) \cdot a + aa \\ -\frac{1}{ff} & \frac{1}{ff} \cdot a + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.22222 & 7.10543 \times 10^{-15} \\ 0.02731 & 0.45 \end{pmatrix}$$

Відстань від фокусу до предмету

$$z := D \cdot ff$$

$$z = -16.477$$

Відстань від фокусу до зображення

$$zz := -A \cdot ff$$

$$zz = 81.368$$

Розмір зображення і апертурний кут в області зображення

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ v/n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 102.222 \\ -7.744 \end{pmatrix}$$

3. Виконання роботи

Завдання 1

Розрахувати основні параметри випукло-пласкої та ввігнуто-пласкої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані,

$$-a = k \cdot f', \text{ мм та } a = k \cdot f', \text{ мм відповідно.}$$

Вихідні дані										
варіант	1		2		3		4		5	
$r_1, \text{ мм}$	30	-30	32	-32	35	-35	37	-37	40	-40
Розташування предмету	$k = 2,15$		2,1		2,15		2,05		2,25	
$y, \text{ мм}$	10		12		15		17		20	
n	1,7512		1,6814		1,7435		1,5175		1,8114	

Вихідні дані										
варіант	6		7		8		9		10	
$r_1, \text{ мм}$	42	-42	44	-44	46	-46	48	-48	50	-50
Розташування предмету	$k = 2,15$		2,1		2,15		2,05		2,25	
$y, \text{ мм}$	12		14		16		18		21	
n	1,7512		1,6814		1,7435		1,5175		1,8114	

Вихідні дані										
варіант	11		12		13		14		15	
$r_1, \text{ мм}$	52	-52	54	-54	56	-56	58	-58	60	-60
Розташування предмету	$k = 2,15$		2,1		2,15		2,05		2,25	
$y, \text{ мм}$	12		14		16		18		21	
n	1,7512		1,6814		1,7435		1,5175		1,8114	

*Примітка.

1* На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно з розрахунком.

2* Виконати побудову зображення для предмета, що розташований на заданій відстані (див. практичне заняття №2)

Завдання 2

Розрахувати основні параметри подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані $-a = k \cdot f', \text{ мм}$ та $a = k \cdot f', \text{ мм}$ відповідно.

Вихідні дані										
варіант	1		2		3		4		5	
$r_1, \text{ мм}$	42	-42	44	-44	46	-46	48	-48	50	-50
$r_2, \text{ мм}$	-42	42	-44	44	-46	46	-48	48	-50	50
Розташування предмету	$k = 2$									
$y, \text{ мм}$	12		14		16		18		21	
n	1,7512		1,6814		1,7435		1,5175		1,8114	

Вихідні дані										
варіант	6		7		8		9		10	
$r_1, \text{ мм}$	52	-52	54	-54	56	-56	58	-58	60	-60
$r_2, \text{ мм}$	-52	52	-54	54	-56	56	-58	58	-60	60
Розташування предмету	$k = 2$									
$y, \text{ мм}$	12		14		16		18		21	
n	1,7512		1,6814		1,7435		,5175		1,8114	

Вихідні дані										
варіант	11		12		13		14		15	
$r_1, \text{ мм}$	30	-30	32	-32	35	-35	37	-37	40	-40
$r_2, \text{ мм}$	-30	30	-32	32	-35	35	-37	37	-40	40
Розташування предмету	$k = 2$									
$y, \text{ мм}$	10		12		15		17		20	
n	1,7512		1,6814		1,7435		1,5175		1,8114	

*Примітка.

1* На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно з розрахунком.

2* Виконати побудову зображення для предмета, що розташований на заданій відстані (див. практичне заняття №2)

Завдання 3

Розрахувати основні параметри плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані $-a = k \cdot f'$, мм та $a = k \cdot f'$, мм відповідно.

Вихідні дані										
варіант	1		2		3		4		5	
r_2 , мм	-10	10	-12	12	-14	10	-10	12	-12	14
Розташування предмету	$k = 1.25$		1.35		1.45		1.35		1.55	
y , мм	7		9		11		13		15	
n	1,5795		1,5826		1,6222		1,6259		1,6334	
Вихідні дані										
варіант	6		7		8		9		10	
r_2 , мм	-20	20	-22	22	-24	20	-20	22	-22	24
Розташування предмету	$k = 1.35$		1.45		1.55		1.65		1.75	
y , мм	17		19		21		23		25	
n	1.5795		1.5826		1.6222		1.6259		1.6334	
Вихідні дані										
варіант	11		12		13		14		15	
r_2 , мм	-30	30	-32	32	-34	34	-36	36	-38	38
Розташування предмету	$k = 1.15$		1.25		1.35		1.45		1.55	
y , мм	25		27		29		31		33	
n	1.5795		1.5826		1.6222		1.6259		1.6334	
*Примітка.										
1* На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку.										
2* Виконати побудову зображення для предмету, що розташований на заданій відстані (див. практичне заняття №2)										

Завдання 4.

Розрахувати основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані $-a = k \cdot f'$, мм та $a = k \cdot f'$, мм відповідно.

Вихідні дані											
варіант	1		2		3		4		5		
r_1 , мм	10	-10	11	-11	12	-12	13	-13	14	-14	
r_2 , мм	20	-20	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24	
Розташування предмету	$k = 0.55$		0.65		0.65		0.55		0.45		
y , мм	7		9		11		13		15		
n	1,6395		1,6709		1,6140		1,7424		1,7521		

Вихідні дані										
варіант	6		7		8		9		10	
$r_1, \text{мм}$	20	-20	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24
$r_2, \text{мм}$	30	-30	31	-31	32	-32	33	-33	34	-34
Розташування предмету	$k=0.55$		0,65		0,65		0,55		0,45	
$y, \text{мм}$	18		19		20		21		22	
n	1,6395		1,6709		1,6140		1,7424		1,7521	

Вихідні дані										
варіант	11		12		13		14		15	
$r_1, \text{мм}$	15	-15	16	-16	17	-17	18	-18	19	-19
$r_2, \text{мм}$	25	-25	26	-26	27	27	28	-28	29	-29
Розташування предмету	$k=0.55$		0,65		0,65		0,55		0,45	
$y, \text{мм}$	13		14		16		16		17	
n	1,6395		1,6709		1,6140		1,7424		1,7521	

Завдання 5.

Розрахувати основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані $-a = k \cdot f', \text{мм}$ та $a = k \cdot f', \text{мм}$ відповідно.

Вихідні дані										
варіант	1		2		3		4		5	
$r_2, \text{мм}, r_1, \text{мм}$	10	-10	11	-11	12	-12	13	-13	14	-14
	20	-20	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24
Розташування предмету	$k=0.55$		0,65		0,65		0,55		0,45	
$y, \text{мм}$	7		9		11		13		15	
n	1,6395		1,6709		1,6140		1,7424		1,7521	

Вихідні дані										
варіант	6		7		8		9		10	
$r_2, \text{мм}, r_1, \text{мм}$	20	-20	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24
	30	-30	31	-31	32	-32	33	-33	34	-34
Розташування предмету	$k=0.55$		0,65		0,65		0,55		0,45	
$y, \text{мм}$	18		19		20		21		22	
n	1,6395		1,6709		1,6140		1,7424		1,7521	

Вихідні дані										
варіант	11		12		13		14		15	
$r_2, \text{мм}$	15	-15	16	-16	17	-17	18	-18	19	-19
$r_1, \text{мм}$	25	-25	26	-26	27	27	28	-28	29	-29
Розташування предмету	$k=0.55$		0,65		0,65		0,55		0,45	

<i>y, мм</i>	13	14	16	16	17
<i>n</i>	1,6395	1,6709	1,6140	1,7424	1,7521

*Примітка.

1* На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно з розрахунком.

2* Виконати побудову зображення для предмета, що розташований на заданій відстані (див. практичне заняття №2)

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Класифікація лінз.
2. Основні параметри оптичної системи з плоско-ввігнутою лінзою.
3. Основні параметри оптичної системи з плоско-випуклою лінзою.
4. Основні параметри оптичної системи з подвійно-ввігнутою лінзою.
5. Основні параметри оптичної системи додатним меніском.
6. Основні параметри оптичної системи від'ємним меніском.
7. Оптична сила системи.

Література

1. Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів: навч. посібник / А. С. Литвиненко, Г. О. Петченко, О. М. Ляшенко, О. М. Діденко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 139 с.

2. Кравченко І.В. Моделювання оптико-електронних приладів: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / І. В. Кравченко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 113с.

3. Чиж І. Г. Теорія оптичних систем : підручник / І. Г. Чиж. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 426 с.

4. Комп'ютерні методи проєктування оптико-механічних систем. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спец.: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. К. Кучеренко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 169 с.

5. Сучасні оптичні технології та системи. Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 56 с.

6. Чиж І.Г. Теорія оптичних систем. Конспект лекцій. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології та спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / І.Г. Чиж ; КПІ ім. Ігоря Сікорського – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 197 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4 ОПТИЧНА СХЕМА ДЛЯ ФОКУСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи

1. Визначити основні параметри гаусового пучка для плоскопаралельного резонатора при $g_1 \cdot g_2 \approx 1$; $g_1 \cdot g_2 = 0.5$.
2. Визначити основні параметри гаусового пучка для конфокального резонатора при $g_1 \cdot g_2 \approx 0$
3. Визначити основні параметри гаусового пучка для концентричного резонатора при $g_1 \cdot g_2 \approx -1$
4. Визначити основні параметри гаусового пучка для напівконфокального резонатора при $g_1 = 0.5, g_2 = 1$.
5. Розрахувати оптичну систему для фокусування лазерного випромінювання

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Класифікація резонаторів.
2. Умова стійкості резонатора. Діаграма стійкості.
3. Конфігурація двох дзеркальних резонаторів.

2. Теоретичні відомості

2.1 Конфігурація двох дзеркальних резонаторів

Розглянемо найпростіший двох дзеркальний резонатор, утворений двома оберненими один до одного ідеально від юстированими та без абераційним відбиваючими поверхнями. Розглядувані резонатори характеризуються:

- відстанню між відбиваючими поверхнями L ;
- радіусом кривизни дзеркал R_i ;
- Поперечними розмірами утворених поверхонь a_i (апертура дзеркала);
- Довжиною хвилі випромінювання λ .

Розглядаючи апертуру дзеркал, виділяють три якісно різні випадки.

1. Апертури дзеркал резонатора нескінченно великі (фактично це означає, що радіус світлової плями на дзеркалі набагато менший за апертуру дзеркала). В даному випадку число Френеля велике; дифракційні втрати вважають повністю відсутніми. Основні параметри резонатора:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2};$$

2. Апертури дзеркал кінцеві і рівні (a - радіус апертури дзеркала).

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, N_1 = \frac{a_1^2}{\lambda \cdot L};$$

Основні параметри резонатора в цьому випадку:

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}, N_2 = \frac{a_2^2}{\lambda \cdot L};$$

3. Апертури дзеркал кінцеві і неоднакові. Основні параметри резонатор

в цьому випадку: $G_1 = \frac{a_1}{a_2} \cdot \left(1 - \frac{L}{R_1}\right)$, $G_2 = \frac{a_2}{a_1} \cdot \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)$, $N = \frac{a_1 \cdot a_2}{\lambda \cdot L}$

Тоді маємо:

- $g_1 = g_2 = 1$ - стійкий резонатор з плоскими дзеркалами (дає високу ефективність використання поперечного перетину, проте ці резонатори досить чутливі до не співвісності дзеркал;

- $g_1 = g_2 = 0$ - стійкий конфокальний резонатор з двома однаково ввігнутими дзеркалами (розмір плями достатньо малий, щоб можна було ефективно використовувати весь поперечний перетин лазерного середовища). Тому конфокальні резонатори використовуються рідко.

- $g_1 = g_2 = -1$ - стійкий концентричний резонатор з двома однаковими ввігнутими дзеркалами (має досить малий розмір плями в центрі резонатора, що може призводити до небажаних ефектів в лазерах великої потужності; високу чутливість до не співвісності дзеркал). Тому концентричні резонатори використовуються досить рідко;

- $g_1 = g_2$ - симетричний резонатор;

- $g_1 = 1, g_2 = \frac{1}{2}$ або $g_1 = \frac{1}{2}, g_2 = 1$ - напівконфокальний резонатор.

Найбільш широко використовується лазерні резонатори утворені або двома ввігнутими дзеркалами з великими радіусами кривизни $R = (2-10) \cdot L$, або плоскими дзеркалом і ввігнутим дзеркалом з великим радіусом кривизни. Ці резонатори дають дещо більший розмір плями, ніж конфокальний резонатор, і мають помірну стійкість до не співвісності дзеркал.

- $g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, g_2 = 1 - \frac{L}{2 \cdot L - R_1}$ - телескопічний нестійкий резонатор

Окрім того, справедливі умови:

$0 < g_1 \cdot g_2 < 1$ - стійкий резонатор для випадку $N_i > 50$, таким резонатор можна розглядати в наближенні геометричної оптики;

$1 - g_1 \cdot g_2 < 0$ - нестійкий резонатор, електромагнітна хвиля вже після декількох відбиттів розходить і більше не потрапляє на дзеркало.

Небажане використання резонаторів з параметрами $g_1 \cdot g_2 = 0$ або $g_1 \cdot g_2 = 1$, оскільки роз юстирування досить легко призводить в нестійку

область. Добру стабільність у відношенні до розюстируванню мають резонатори

$$3 \quad g_1 \cdot g_2 = \frac{1}{2}.$$

Умова стійкості резонатора має вигляд

$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1 \quad (4.1)$$

Якщо параметри g_1, g_2 відкритого резонатора задовольняють умові (4.1), то такий резонатор здатний утримувати всередині себе випромінювання; в протилежному випадку резонатор не утримує випромінювання. Умову стійкості часто представляють графічно (**діаграма стійкості резонатора**), використовуючи координатну площину з осями, на яких відкладаються значення g_1, g_2 рис.4.1. Якщо зображувати резонатор відповідною точкою на площині g_1, g_2 , то стійкі резонатори потраплять у заштриховану область, включаючи її межі, які описуються кривими $g_1 \cdot g_2 = 1, g_1 \cdot g_2 = 0$.

Площина g_1, g_2 розбита на області. Кожній із цих областей відповідає визначений тип геометрії резонатора.

З фізичної точки зору стійкість резонатора пов'язана з відносною малістю дифракційних витрат. Вихід за межі заштрихованої області пов'язаний з суттєвим збільшенням дифракційних витрат. Криві $g_1 \cdot g_2 = 1, g_1 \cdot g_2 = 0$, розділяють області малих та великих дифракційних витрат.

Плоскопаралельний, конфокальний, концентричний та напівконцентричний резонатори потрапляють на границю області стійкості. Це означає, що дифракційні втрати в них чутливі до відхилення параметрів від теоретично ідеальних значень. Тому на практиці заздалегідь відхиляються ненабагато в область стійкості за рахунок невеликої зміни довжини резонатора.

2.2 Гаусів пучок

Гаусів пучок – це пучок у якого амплітуда напруженості поля максимальна на вісі пучка і експоненційно зменшується до краю у відповідності з гладкою функцією Гауса.

Пучки когерентного випромінювання з гаусовим профілем розподілу інтенсивності мають саму високу спрямованість, сумісну з хвильовою природою випромінювання. Гаусів пучок представляє собою найбільше наближення, яке допускає дифракція, до паралельного пучка світла з обмеженим поперечним перетином.

У випадку використання сферичних або сферичного і плоского дзеркал у стійкому резонаторі нормований розподіл щільності потоку випромінювання описується функціями Ерміт-Гауса з прямокутною апертурою:

$$E_{mn}(x, y) = \frac{W_0}{W(z)} \cdot H_m\left(\frac{\sqrt{2} \cdot x}{W(z)}\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2} \cdot y}{W(z)}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{W(z)^2}\right) \quad (4.2)$$

де W_0 - перетяжка пучка;

$W(z)$ - ширина пучка на будь-якій відстані Z ;

$H_m\left(\frac{\sqrt{2} \cdot x}{W(z)}\right), H_n\left(\frac{\sqrt{2} \cdot y}{W(z)}\right)$ - поліноми Ерміта, відповідного індексу моди;

x, y - поперечна координата.

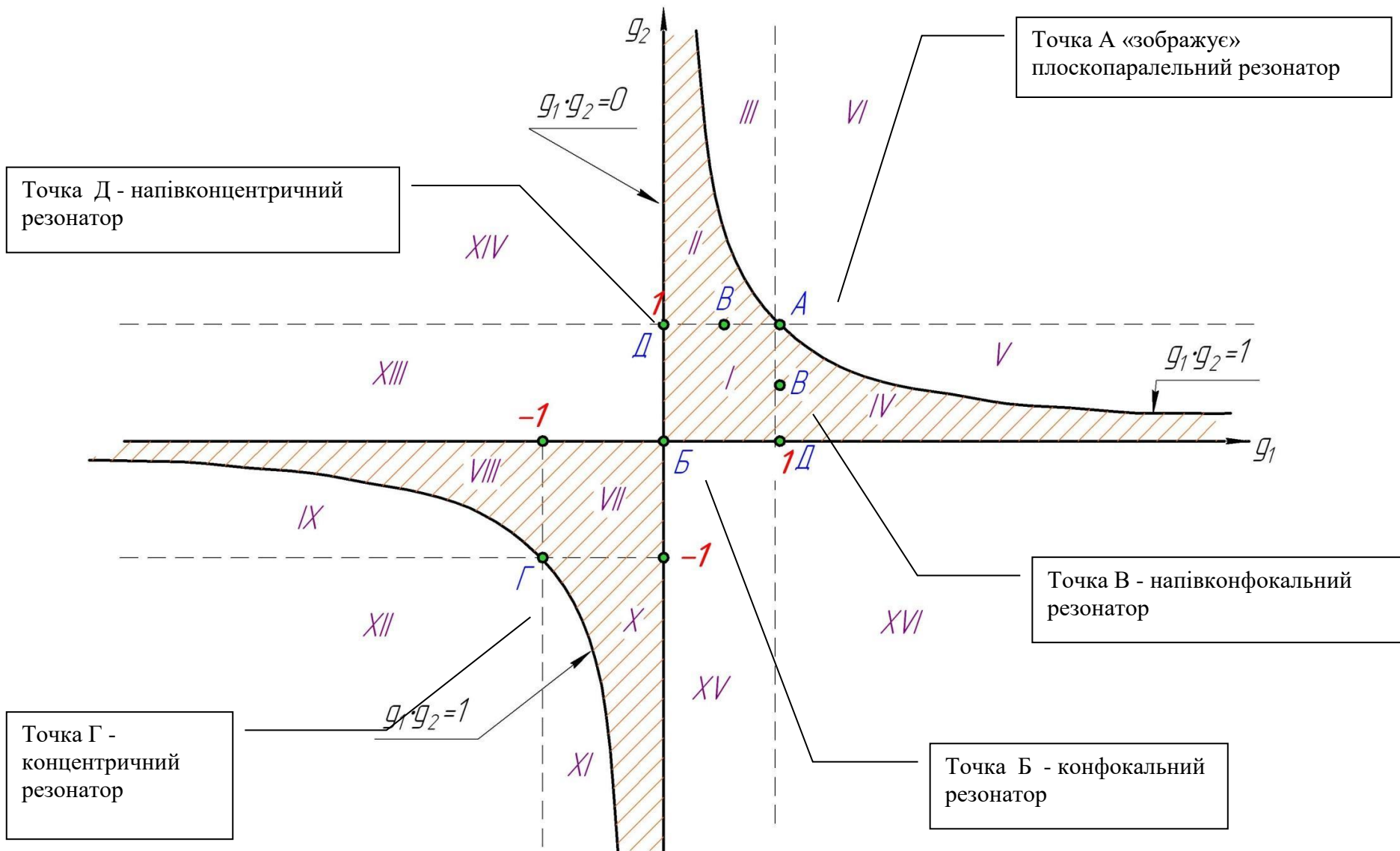


Рисунок 4.1 - Діаграма стійкості резонатора

Залежність ширини пучка від координати Z характеризується гіперболами:

$$\left(\frac{W}{W_0}\right)^2 - \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^2 = 1 \quad (4.3)$$

де $Z_0 = \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda}$ - радіус дифракційного розходження;

$$W(Z) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z}{2 \cdot k \cdot W_0^2}\right)^2\right]} - \text{ширина пучка на будь-якій відстані } Z.$$

Із формули (4.3) маємо, що на достатньо великій відстані $Z_0 \gg \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda}$ від

перетяжки пучка «дальня зона дифракції», радіус кривизни поверхні може бути описаний виразом $R(z) \approx z$. Таким чином в «дальній зоні» гаусів пучок перетворюється в сферичну хвилю і може розглядатися в наближенні геометричної оптики. На границі між дальньою та ближньою зонами $R(z) \approx 2 \cdot Z_0$.

В «ближній зоні» $Z_0 \leq \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda}$, світлові промені в цій зоні не є прямолінійними, а хвильовий фронт плоский.

Вище розглядали розповсюдження гаусового пучка у вільному просторі або в однорідному середовищі. Розглянемо тепер структуру електромагнітного поля в оптичному резонаторі, який утворений двома сферичними дзеркалами. Структура пучка показана на рис.4.3.

Стаціонарні стани поля, як і у випадку резонатора із плоскими паралельними дзеркалами, представляє собою стоячі електромагнітні хвилі, тобто нормальні коливання напруженості поля (моди) з визначеними дискретними частотами. Умова циклічності вимагає, щоб світловий пучок (який відповідає даній моді) повністю відтворював сам себе протягом одного циклу, тобто при подвійному проходженні резонатора. У випадку сферичних дзеркал цій умові задовольняє гаусів пучок з деякими параметрами, які залежать від геометрії резонатора.

Нехай в деяких перетинах пучка z_1, z_2 встановлені сферичні дзеркала, відбиваючі поверхні яких співпадають із хвильовими поверхнями гаусового пучка. Тоді початковий гаусів пучок після відбиття буде перетворений в такий же пучок, який буде розповсюджуватися в протилежному напрямку, а після відбиття від другого дзеркала він повністю зійдеться із початковим. Практично достатньо щоб діаметр дзеркала в декілька разів перевищував діаметр пучка на дзеркалах W_{dz} .

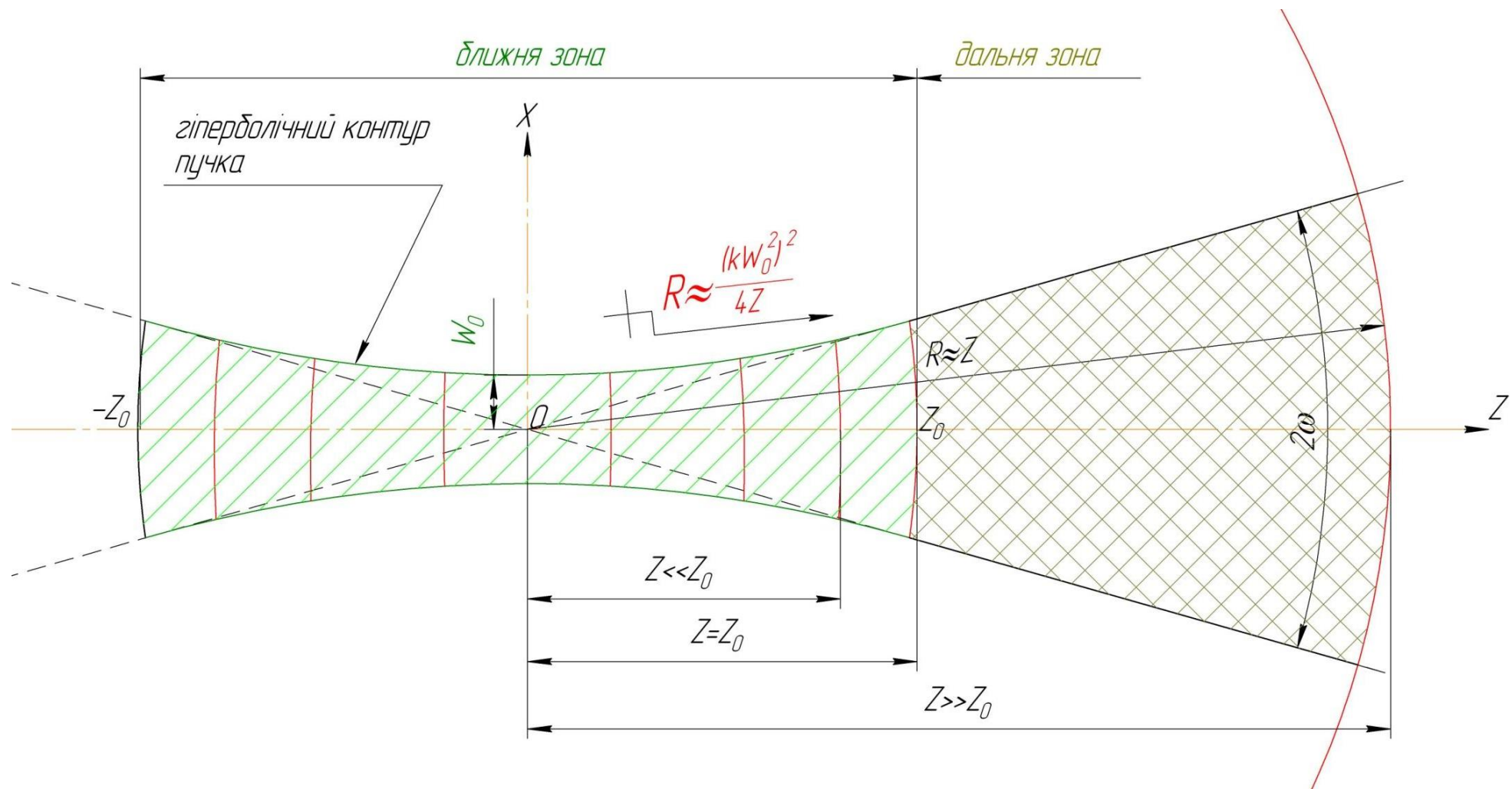


Рисунок 4.2 - Гаусів пучок

Положення перетяжки відносно вершин дзеркал резонатора визначають за формулами [1-3]:

$$z_1 = \frac{L \cdot (R_2 - L)}{R_1 + R_2 - 2 \cdot L}, \quad z_2 = \frac{L \cdot (R_1 - L)}{R_1 + R_2 - 2 \cdot L} \quad (4.4)$$

$$z_1 = \frac{L \cdot g_2 \cdot (1 - g_1)}{g_1 + g_2 - 2 \cdot g_1 \cdot g_2}, \quad z_2 = \frac{L \cdot g_1 \cdot (1 - g_2)}{g_1 + g_2 - 2 \cdot g_1 \cdot g_2}$$

де R_1, R_2 - радіуси кривизни дзеркал;

L - відстань між дзеркалами.

Параметр конфокальності гаусового пучка визначаємо за формулою [1-3]:

$$R_e = \frac{2 \cdot \sqrt{(R_1 - L) \cdot (-R_2 + L) \cdot (L - R_1 - R_2)} \cdot L}{(-R_1 - R_2 + 2 \cdot L)},$$

$$R_e = \frac{2 \cdot L \cdot \sqrt{g_1 \cdot g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}}{g_1 + g_2 - 2 \cdot g_1 \cdot g_2} \quad (4.5)$$

Радіус гаусового пучка в перетяжці визначаємо із формули [1-3]:

$$W_0 = \sqrt[4]{\frac{L \cdot (R_1 - L) \cdot (R_2 - L) \cdot (R_1 + R_2 - L)}{k^2 \cdot ((R_1 + R_2 - 2 \cdot L)^2)}},$$

$$W_0 = \sqrt[4]{\frac{L \cdot (R_1 - L) \cdot (R_2 - L) \cdot (R_1 + R_2 - L)}{((R_1 + R_2 - 2 \cdot L)^2)} \cdot \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2},$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{L \cdot \lambda}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g_1 \cdot g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}{(g_1 + g_2 - 2 \cdot g_1 \cdot g_2)^2}} \quad (4.6)$$

Тоді радіуси гаусового пучка на дзеркалах резонатора визначаються [1-3]:

$$W_1 = \sqrt{\left(\frac{R_1}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (L - R_2)}{(L - R_2) \cdot (R_1 + R_2 - L)}}}, \quad W_2 = \sqrt{\left(\frac{R_2}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (L - R_1)}{(L - R_1) \cdot (R_1 + R_2 - L)}}}$$

$$W_1 = \sqrt{\left(\frac{R_1}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (R_2 - L)}{(R_1 - L) \cdot (R_1 + R_2 - L)}}}, \quad W_2 = \sqrt{\left(\frac{R_2}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (R_1 - L)}{(R_2 - L) \cdot (R_1 + R_2 - L)}}},$$

$$W_1 = \sqrt{\frac{L \cdot \lambda}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g_2}{g_1 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}}, \quad W_2 = \sqrt{\frac{L \cdot \lambda}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g_1}{g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}} \quad (4.7)$$

Як видно із формули (4.7) радіус плями на дзеркалах не залежить від розміру апертури дзеркала. Проте, дифракційні втрати залежать від амплітуди поля на краю дзеркала. Чим менша амплітуда поля на краю дзеркала, тим менші втрати потужності.

Так збільшення розміру дзеркала не впливає на розмір плями, то очевидно, що збільшення розмірів дзеркала буде супроводжуватися зменшенням поля на краю дзеркала, що і собі призведе до відповідного зменшення дифракційних втрат.

Радіус хвильового фронту R на відміну від звичайної сферичної хвилі залежить від положення її центру і від відстані Z , тобто від вибраного перетину пучка.

Радіус хвильового фронту гаусового пучка визначається за формулою:

$$R(Z) = Z \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot k \cdot W_0^2}{2 \cdot Z} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

Кут дифракційного розходження лазерного пучка для основної моди визначається:

$$2\omega = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot W_0} \quad (4.9)$$

Резонансні частоти резонатора:

$$\nu_n = \frac{n \cdot c}{2 \cdot L} + \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \text{arcCos} \sqrt{g_1 \cdot g_2} \quad (4.10)$$

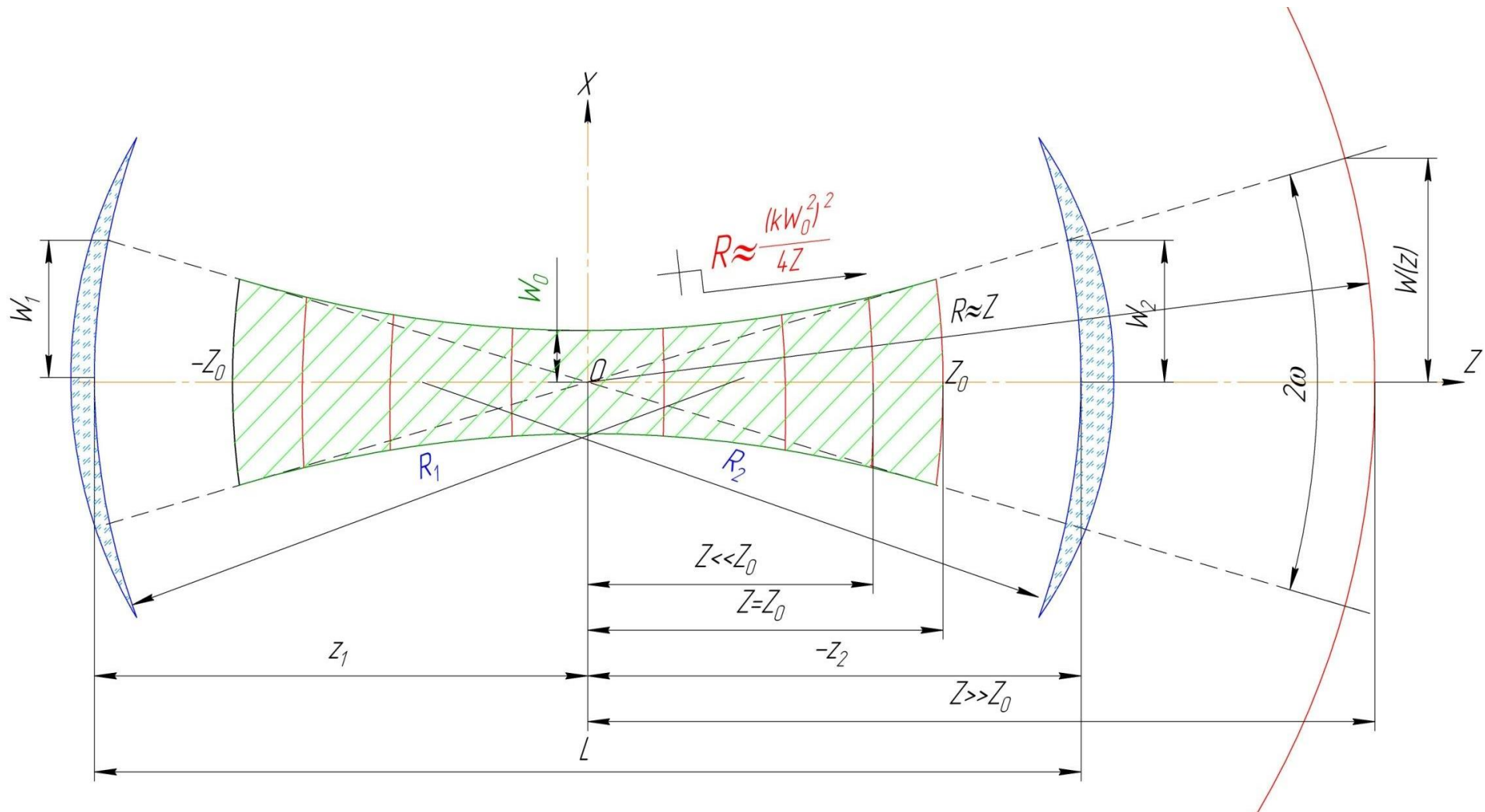


Рисунок 4.3 - Гаусів пучок у резонаторі із сферичними дзеркалами

2.3 Оптична система фокусування лазерного променя

Для отримання великих значень енергетичної освітленості, що створюється лазером, потік його випромінювання необхідно сконцентрувати в пляму мінімальних розмірів. Цією плямою, очевидно, може бути перетяжка лазерного пучка, перетвореного оптичною системою рис.4.4, рис.4.5.

Нижче наведені розрахункові формули, які дозволяють визначити параметри перетвореного лазерного пучка після проходження крізь таку оптичну систему з фокусною відстанню f' :

- перетворений конфокальний параметр резонатора:

$$R_e' = \frac{R_e}{\left(1 + \frac{a}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f'}\right)^2}; \quad R_e' = \frac{4 \cdot R_e \cdot f'^2}{4 \cdot z^2 + R_e^2} \quad (4.11)$$

де R_e - конфокальний параметр резонатора

- радіус перетвореного хвильового фронту:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{f'} \quad (4.12)$$

- відстань a' :

$$1 - \frac{a'}{f'} = \frac{1 + \frac{a}{f'}}{\left(1 + \frac{a}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f'}\right)^2} \Rightarrow a' \quad (4.13)$$

• діаметр перетяжки і кут розходження перетвореного пучка відповідно:

$$2 \cdot W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}}; \quad 2 \cdot \omega' = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e'}} \quad (4.14)$$

- лінійне у кутове збільшення в перетяжках:

$$\beta_n = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0}; \quad \gamma_n = \frac{\omega'}{\omega} \quad (4.15)$$

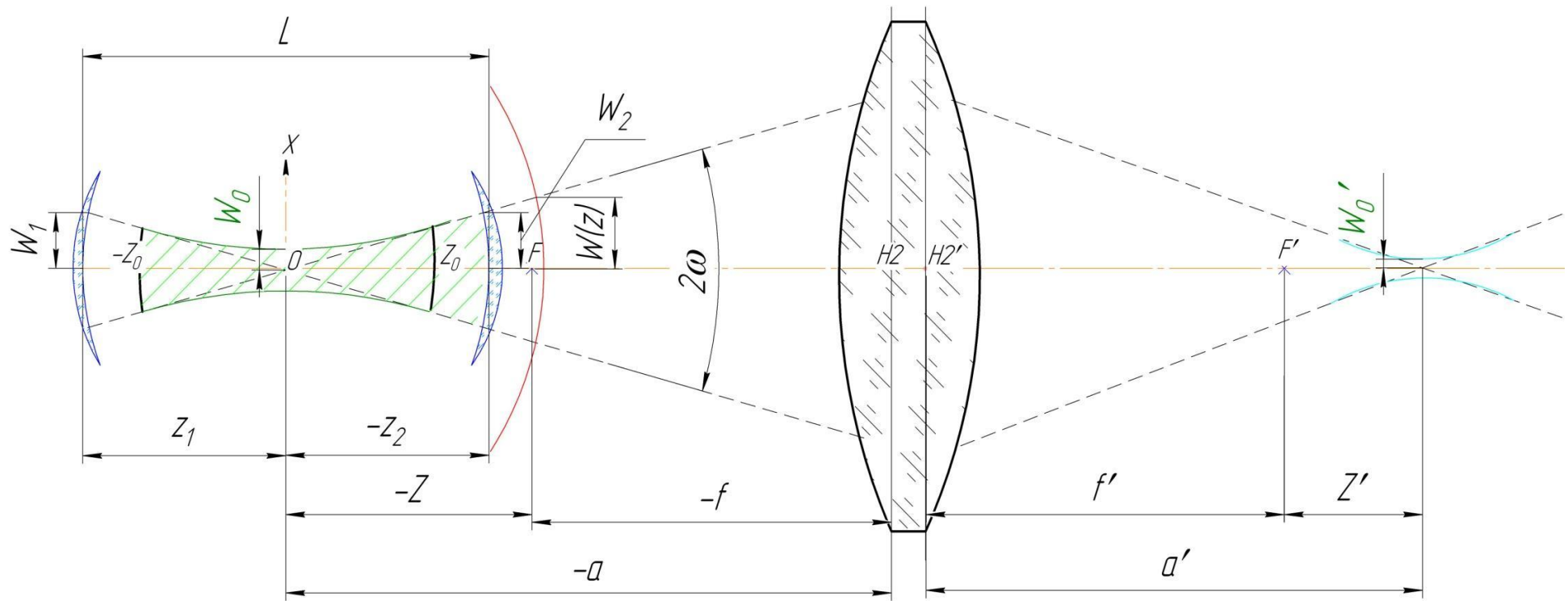


Рисунок 4.4 - Перетворення лазерного променя позитивною тонкою лінзою

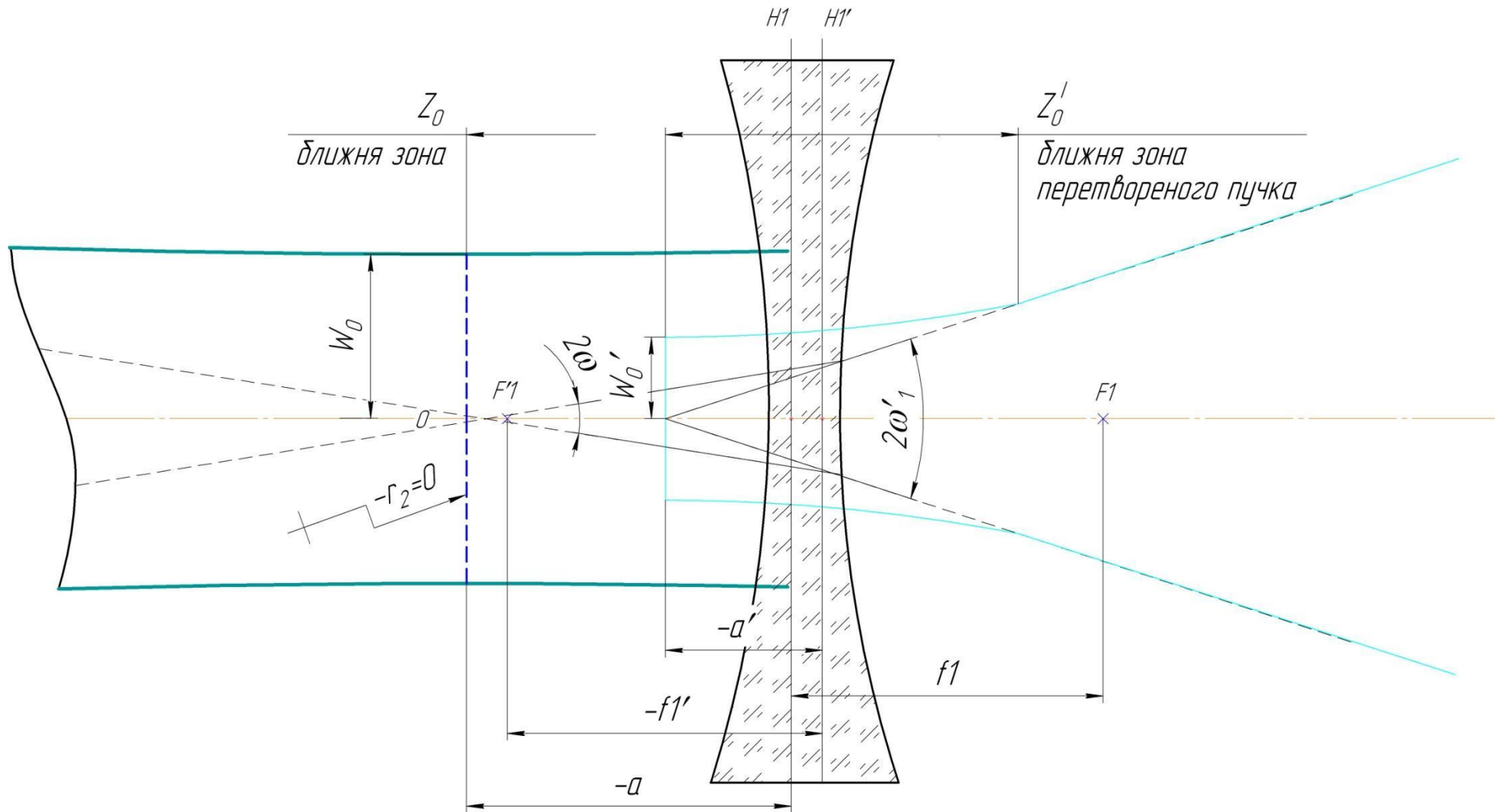


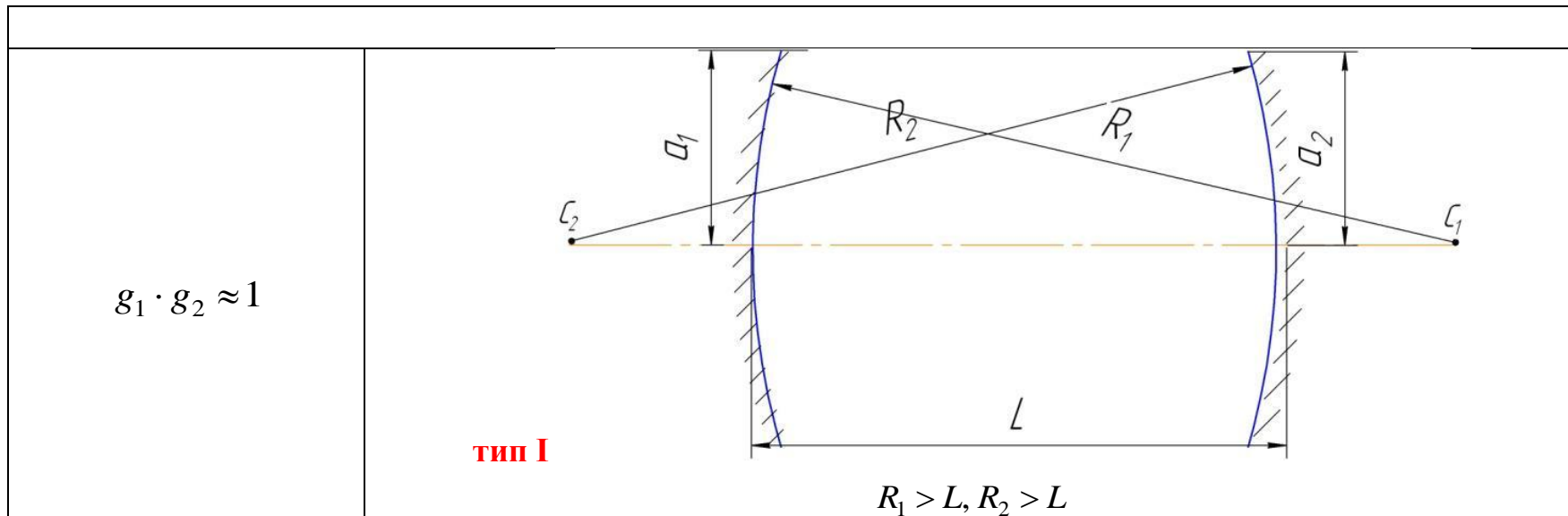
Рисунок 4.5 - Перетворення лазерного променю від'ємною тонкою лінзою

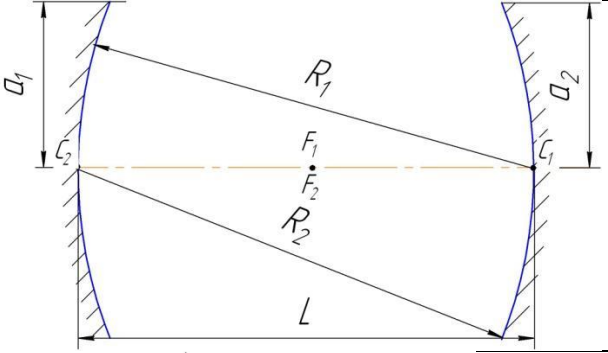
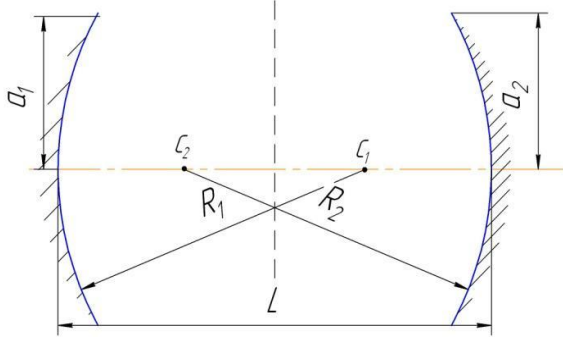
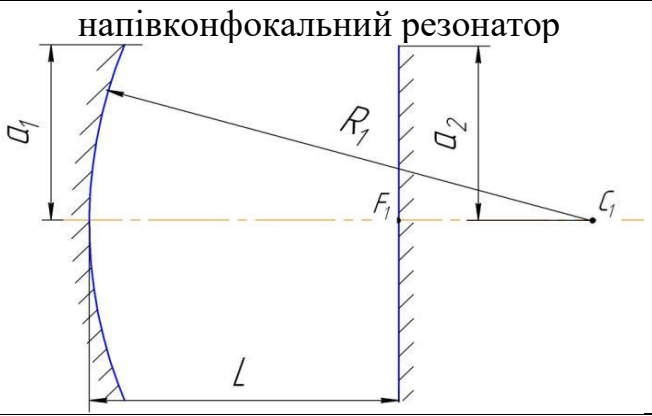
3. Виконання роботи

Завдання 1. Проаналізувати основні параметри гаусового пучка для резонатора типу I, типу VII та напівконфокального

варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda, \text{нм}$	630	633	610	594	543	633	610	594	543	633	610
$q \times 10^6$	1	1	1,2	1,25	1,55	1,22	1,37	1,37	1,15	1,4	1,15

варіант	11	12	13	14	15
$\lambda, \text{нм}$	594	543	633	610	594
$q \times 10^6$	1,3	1,45	0,5	0,75	0,85



<p>$g_1 \cdot g_2 \approx 0$</p> <p>Показано приклад розрахунку</p>	
<p>$g_1 \cdot g_2 \approx 1$</p> <p>$R_1 = \frac{L}{2} \text{ м}, R_2 = \frac{L}{2} \text{ м}$</p>	<p>тип VII</p>  <p>$\frac{L}{2} < R_1 < L, \frac{L}{2} < R_2 < L$</p>
<p>$g_1 = 1, g_2 = \frac{1}{2}$</p> <p>$g_1 \cdot g_2 = \frac{1}{2}$</p>	<p>напівконфокальний резонатор</p> 

При використанні лазерного випромінювання нерідко виникає необхідність перетворити параметри пучка в залежності від поставленої задачі.

Наведемо порядок габаритного розрахунку системи, що фокусує лазерне випромінювання. Розрахунок виконується при умові, що тип лазера вибраний і, як наслідок відомі його параметри. Окрім того, за технічними умовами відомий діаметр перетяжки перетвореного пучка.

Алгоритм розрахунку фокусувальної системи

Початковий лазерний пучок. Розрахунок оптичного резонатора

1. В залежності від типу резонатора (для I зони стійкості) повинна виконуватися умова

$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1$$

Звідси визначаємо радіуси кривизни дзеркал:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$

2. Визначаємо положення перетяжки відносно вершин дзеркал резонатора визначають за формулами [1-3]:

$$z_1 = \frac{L \cdot (R_2 - L)}{R_1 + R_2 - 2 \cdot L}, \quad z_2 = \frac{L \cdot (R_1 - L)}{R_1 + R_2 - 2 \cdot L}$$

$$z_1 = \frac{L \cdot g_2 \cdot (1 - g_1)}{g_1 + g_2 - 2 \cdot g_1 \cdot g_2}, \quad z_2 = \frac{L \cdot g_1 \cdot (1 - g_2)}{g_1 + g_2 - 2 \cdot g_1 \cdot g_2}$$

де R_1, R_2 - радіуси кривизни дзеркал;

L - відстань між дзеркалами.

3. Визначаємо параметр конфокальності гаусового пучка за формулою [1-3]:

$$R_e = \frac{2 \cdot \sqrt{(R_1 - L) \cdot (-R_2 + L) \cdot (L - R_1 - R_2)} \cdot L}{(-R_1 - R_2 + 2 \cdot L)}$$

$$R_e = \frac{2 \cdot L \cdot \sqrt{g_1 \cdot g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}}{g_1 + g_2 - 2g_1 \cdot g_2}$$

4. Визначаємо радіус гаусового пучка в перетяжці із формули [1-3]:

$$W_0 = \sqrt[4]{\frac{L \cdot (R_1 - L) \cdot (R_2 - L) \cdot (R_1 + R_2 - L)}{k^2 \cdot ((R_1 + R_2 - 2 \cdot L)^2)}}, \quad W_0 = \sqrt[4]{\frac{L \cdot (R_1 - L) \cdot (R_2 - L) \cdot (R_1 + R_2 - L) \cdot \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2}{((R_1 + R_2 - 2 \cdot L)^2)}}$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{L \cdot \lambda}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g_1 \cdot g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}{(g_1 + g_2 - 2 \cdot g_1 \cdot g_2)^2}}$$

5. Тоді радіуси гаусового пучка на дзеркалах резонатора визначаємо із формули [1-3]:

$$W_1 = \sqrt{\left(\frac{R_1}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (L - R_2)}{(L - R_2) \cdot (R_1 + R_2 - L)}}}, \quad W_2 = \sqrt{\left(\frac{R_2}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (L - R_1)}{(L - R_1) \cdot (R_1 + R_2 - L)}}}$$

$$W_1 = \sqrt{\left(\frac{R_1}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (R_2 - L)}{(R_1 - L) \cdot (R_1 + R_2 - L)}}},$$

$$W_2 = \sqrt{\left(\frac{R_2}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (R_1 - L)}{(R_2 - L) \cdot (R_1 + R_2 - L)}}}$$

5. Визначаємо залежність ширини пучка від координати

$$W(Z) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z}{2 \cdot k \cdot W_0^2}\right)^2\right]}$$

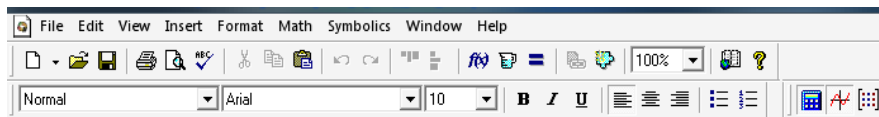
6. Радіус хвильового фронту гаусового пучка визначаємо за формулою:

$$R(Z) = Z \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot k \cdot W_0^2}{2 \cdot Z}\right)^2\right]$$

7. Кут дифракційного розходження лазерного пучка для основної моди визначаємо за формулою:

$$2\omega = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot W_0}$$

Приклад цього розрахунку в конфокального резонатора пакеті MathCAD наведено нижче.



Приклад розрахунку конфокального резонатора (тип I)

Завдання 1. Проаналізувати основні параметри гаусового пучка

Із умови стійкості резонатора визначаємо радіуси кривизни дзеркал

$$g1 = 1 - \frac{L}{R1} \quad R1 = \frac{-L}{(g1 - 1)} \quad g2 = 1 - \frac{L}{-R2} \quad R2 = \frac{L}{(g2 - 1)}$$

Дано

- довжина хвилі резонатора
- довжина резонатора
- хвильове число резонатора

$$\lambda = 0.63 \cdot 10^{-6} \quad L = \frac{10^6 \cdot \lambda}{2} \quad L = 0.315$$

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \quad k = 4.98665501 \times 10^6$$

- параметр g1 та g2 резонатора

*необхідно підібрати таким чином, що виконувалася умова для розрахованого резонатора

$$g1 = 3.17561 \cdot 10^{-5} \quad g2 = 3.17561 \cdot 10^{-5} \\ g1 \cdot g2 = 1.00844989 \times 10^{-9}$$

1. Визначаємо радіуси кривизни дзеркал

$$R1 = \frac{-L}{(g1 - 1)} \quad R1 = 0.31501 \quad R2 = \frac{-L}{(g2 - 1)} \quad R2 = 0.31501$$

2. Визначаємо положення перетяжки відносно вершин дзеркал резонатора

$$z1 = \frac{L(R2 - L)}{(-2L + R1 + R2)} \quad z1 = 0.1575 \quad z2 = \frac{L(R1 - L)}{(-2L + R1 + R2)} \quad z2 = 0.1575 \quad z1 + z2 = 0.315$$

$$z1 = \frac{L \cdot g2 \cdot (1 - g1)}{g1 + g2 - 2 \cdot g1 \cdot g2} \quad z1 = 0.1575 \quad z2 = \frac{L \cdot g1 \cdot (1 - g2)}{g1 + g2 - 2 \cdot g1 \cdot g2} \quad z2 = 0.1575$$

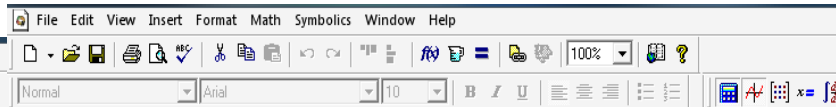
3. Визначаємо параметр конфокальності гаусового пучка за формулою

$$R_e = \frac{2 \cdot \sqrt{(R1 - L) \cdot (R2 + L) \cdot (L - R1 + R2) \cdot L}}{(-R1 + R2 + 2 \cdot L)} \quad R_e = \frac{2 \cdot \sqrt{(R1 - L) \cdot (-R2 + L) \cdot [(L - R1) - R2] \cdot L}}{2L - R1 - R2} \quad R_e = -0.31501$$

$$R_e = \frac{2 \cdot L \cdot \sqrt{g1 \cdot g2 \cdot (1 - g1 \cdot g2)}}{g1 + g2 - 2 \cdot g1 \cdot g2} \quad R_e = \frac{-2L \cdot \sqrt{g1 \cdot g2 \cdot (1 - g1 \cdot g2)}}{g1 + g2 - 2 \cdot g1 \cdot g2} \quad R_e = -0.31501$$

4. Визначаємо радіус гаусового пучка в перетяжці

$$W_0 = \sqrt[4]{\frac{L \cdot (R1 - L) \cdot (R2 - L) \cdot (R1 + R2 - L)}{k^2 \cdot ((R1 + R2 - 2 \cdot L)^2)}}$$



$$W_0 = \sqrt[4]{\frac{L \cdot (R1 - L) \cdot (R2 - L) \cdot (R1 + R2 - L)}{k^2 \cdot (R1 + R2 - 2L)^2}}$$

$$W_0 = 1.77722541 \times 10^{-4}$$

Тоді радіуси гаусового пучка на дзеркалах резонатора визначаємо за формулою

$$W_1 = \sqrt{\left(\frac{R1}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (L - R2)}{(L - R2) \cdot (R1 + R2 - L)}}} \quad W_1 = \sqrt{\left(\frac{R1}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (L - R2)}{(L - R2) \cdot (R1 + R2 - L)}}} \quad W_1 = 2.51333637 \times 10^{-4}$$

$$W_1 = \sqrt{\frac{L \cdot \lambda}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g_2}{g_1 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}} \quad w_1 = \sqrt{\frac{L \cdot \lambda}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g_2}{g_1 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}} \quad w_1 = 2.51333637 \times 10^{-4}$$

$$W_2 = \sqrt{\left(\frac{R2}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (L - R1)}{(L - R1) \cdot (R1 + R2 - L)}}} \quad W_2 = \sqrt{\left(\frac{R2}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (L - R1)}{(L - R1) \cdot (R1 + R2 - L)}}} \quad W_2 = 2.51333637 \times 10^{-4}$$

$$W_2 = \sqrt{\frac{L \cdot \lambda}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g_1}{g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}} \quad w_2 = \sqrt{\frac{L \cdot \lambda}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{g_1}{g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}} \quad w_2 = 2.51333637 \times 10^{-4}$$

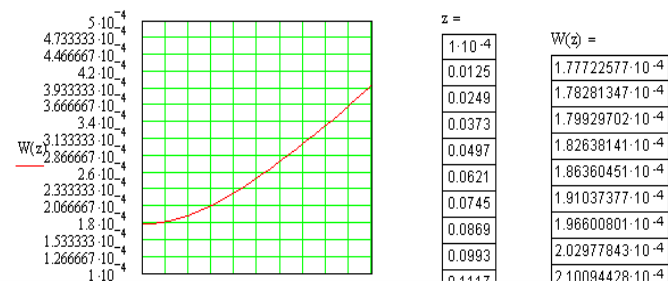
5. Визначаємо залежність ширини пучка від координати z

Для цього необхідно визначити радіус дифракційної роздільності

$$Z_0 = \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda} \quad Z_0 = \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda} \quad Z_0 = 0.157505$$

Задаємо відстань z на якій будемо визначати ширину пучка. Цю відстань вибираємо довільно, але більшою у 2 рази за радіус дифракційної роздільності

$$z = 0.0001, 0.0125, \dots, 2.1 \cdot Z_0 \quad k = \frac{\pi}{\lambda} \quad W(z) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left[\frac{z \cdot 2}{2k \cdot (W_0)^2}\right]^2\right]} \quad W(2 \cdot Z_0) = 3.97399682 \times 10^{-4}$$

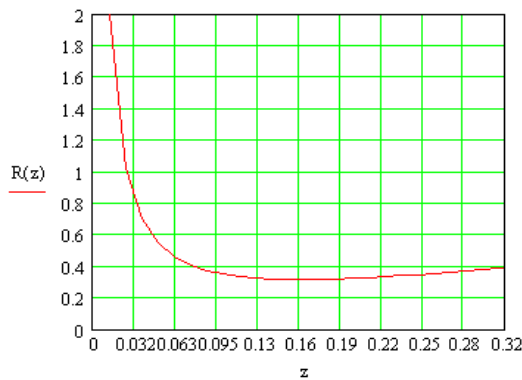




6. Визначаємо радіус хвильового фронту гаусового пучка за формулою

$$R(Z) = Z \cdot \left[1 + \left(\frac{k \cdot W_0^2}{2 \cdot Z} \right)^2 \right]$$

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(2k \cdot \frac{W_0^2}{2 \cdot z} \right)^2 \right]$$



z =	R(z) =
1.10-4	248.0783555
0.0125	1.99712604
0.0249	1.02119821
0.0373	0.70238916
0.0497	0.54885142
0.0621	0.46158189
0.0745	0.40749095
0.0869	0.37237555
0.0993	0.34912704
0.1117	0.33379334
0.1241	0.3240019
0.1365	0.31824231
0.1489	0.31550729
0.1613	0.31509929
0.1737	0.31651995
0.1861	0.31940374
0.1985	0.32347645
0.2109	0.32852838
0.2233	0.3343964
0.2357	0.3409517
0.2481	0.34809124
0.2605	0.35573158
0.2729	0.36380445
0.2853	0.37225347
0.2977	0.38103163
0.3101	0.39009944
0.3225	0.39942349

На границі між близькою і дальньою зоною радіус кривизни хвильового фронту приблизно складає

$$R(z) \approx 2 \cdot Z_0$$

$$R((1 \cdot Z_0)) = 0.31501$$

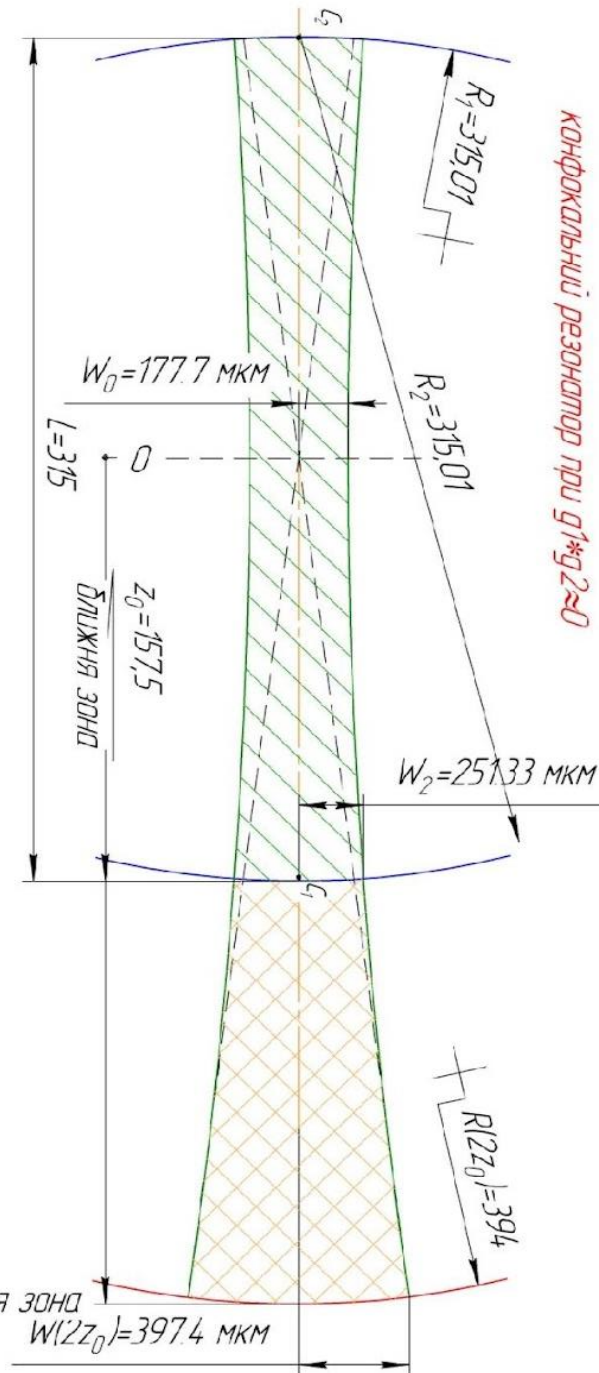
$$R((2 \cdot Z_0)) = 0.3937625$$

7. Кут дифракційної розходження лазерного пучка для основної моди

$$2\omega = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot W_0}$$

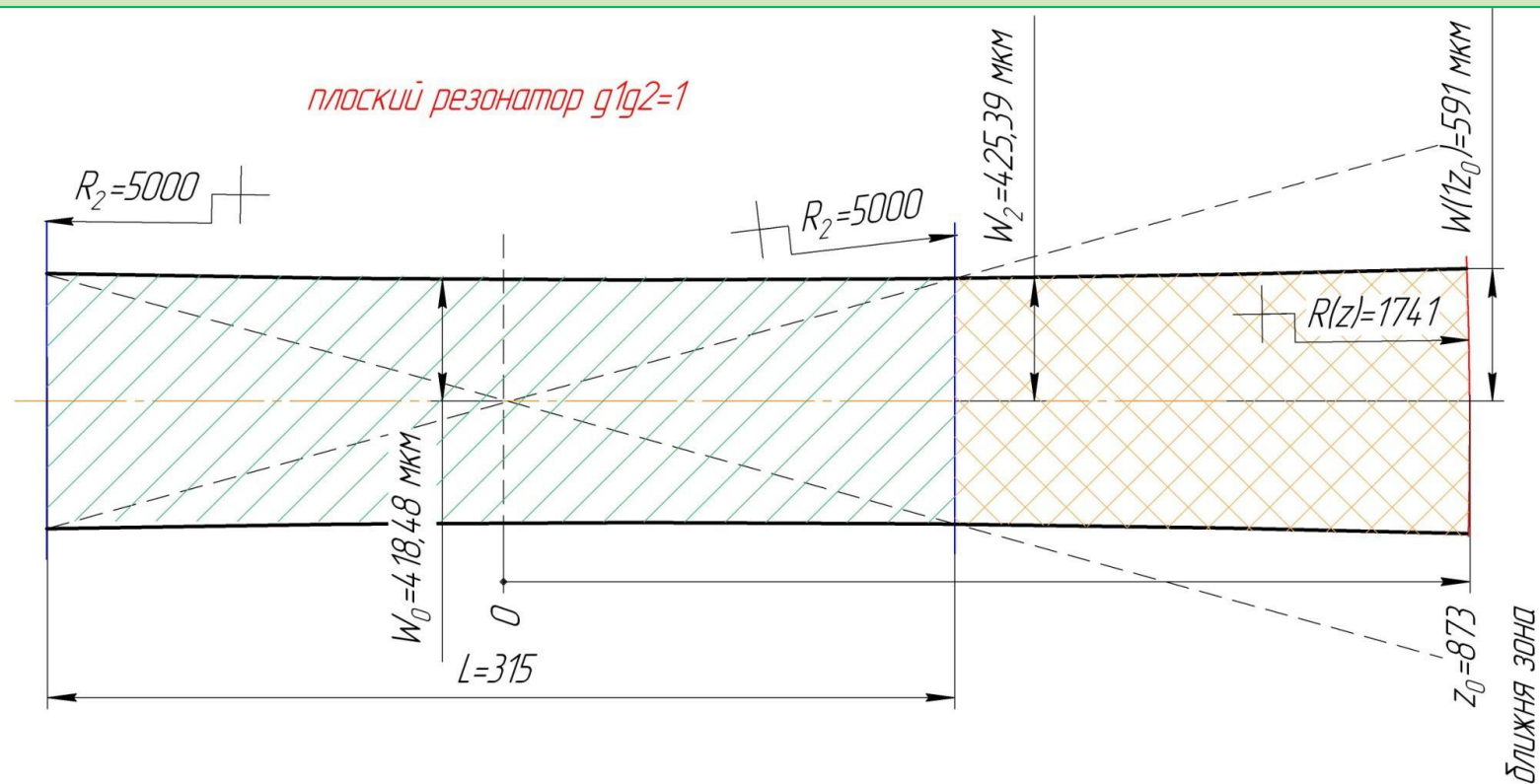
$$\omega = \left(\frac{\lambda}{\pi \cdot W_0} \right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\omega = 0.06465034$$



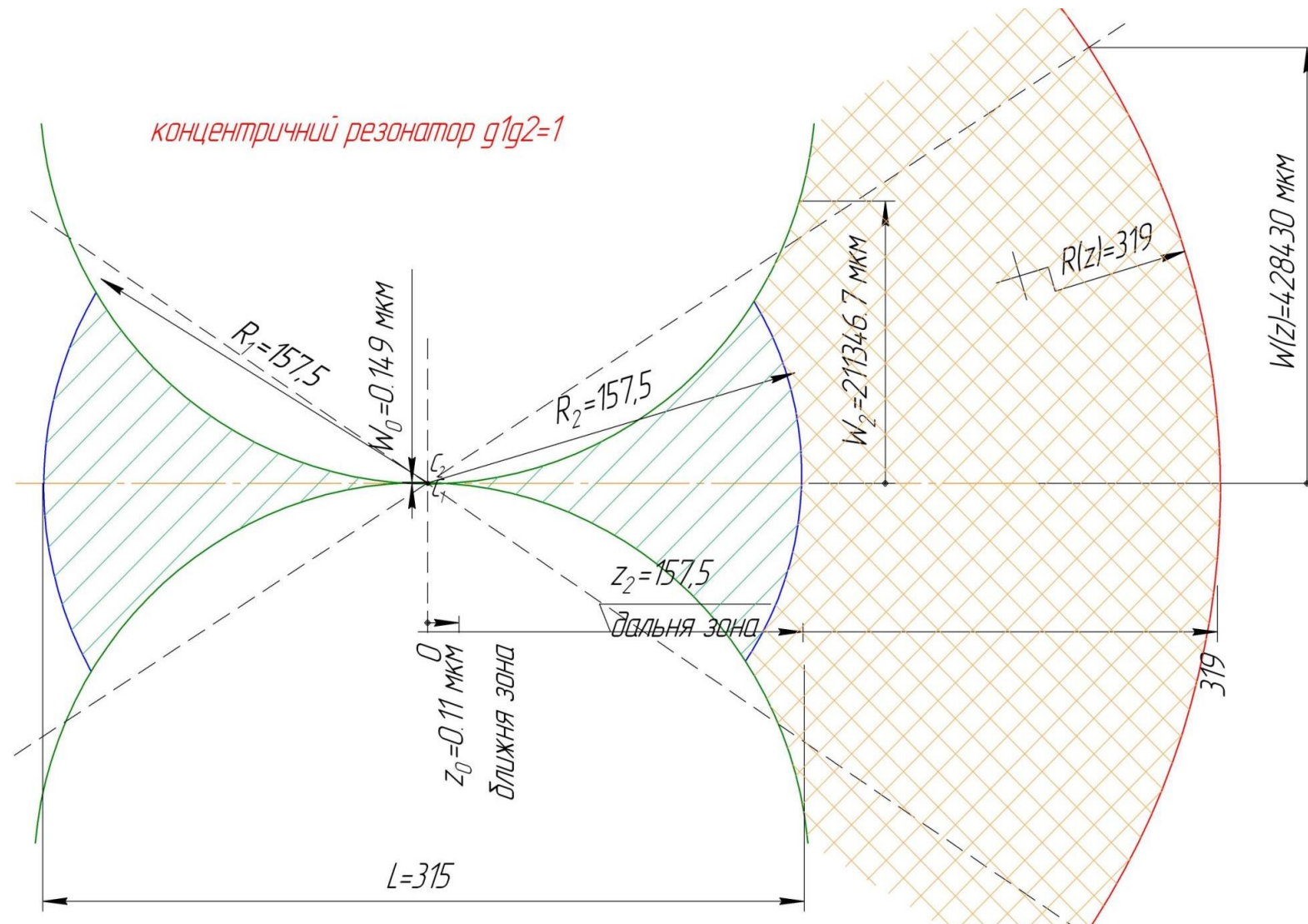
8. Виконуємо аналогічний розрахунок і для інших типів резонатора.

Для виконання ескізу резонатора та форми гаусового пучка необхідні наступні параметри: $z_1, z_2, W_0, W_1, W_2, Z_0, W(z), R(z)$



$$z_1 = 0.1575, \quad z_2 = 0.1575, \quad W_0 = 4.18488 \times 10^{-4}, \quad W_1 = 4.25239 \times 10^{-4}, \quad W_2 = 4.25239 \times 10^{-4}, \quad Z_0 = 0.87332, \quad W(1Z_0) = 5.91831 \times 10^{-4}, \\ R(1Z_0) = 1.74665$$

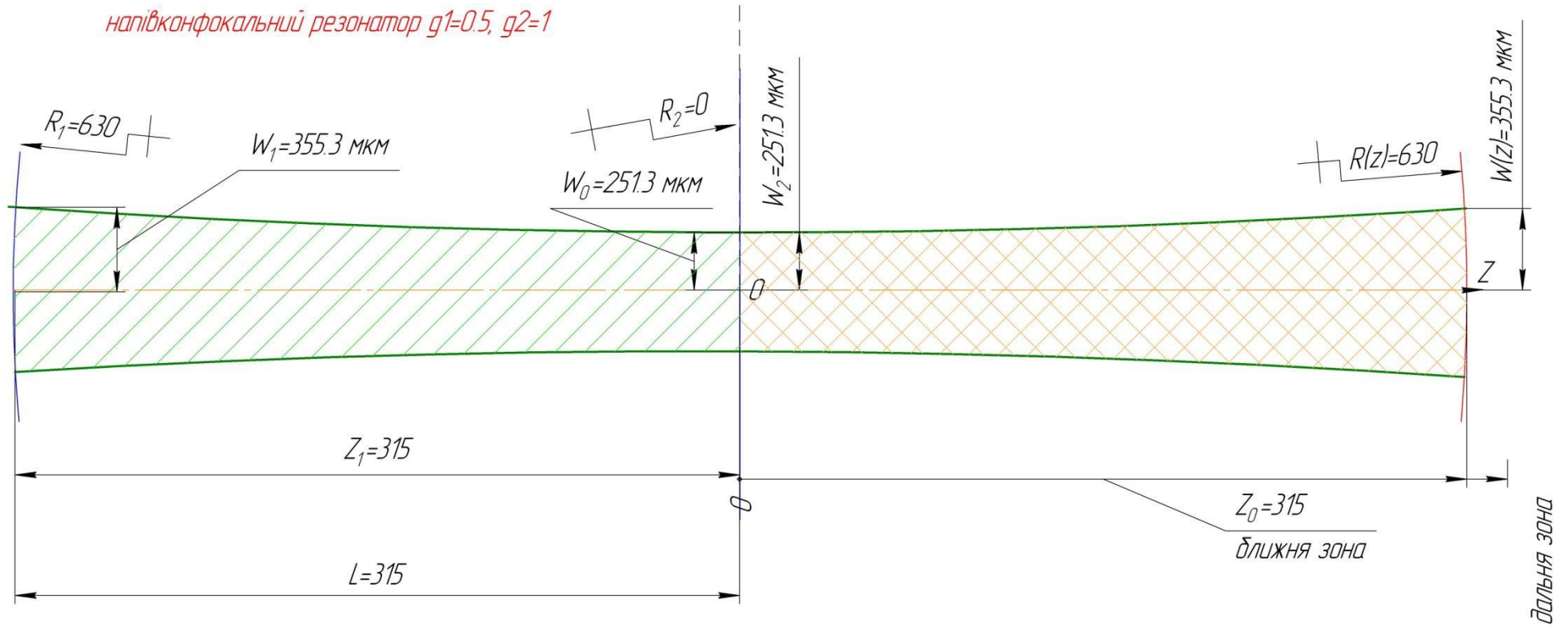
Висновок: Для плоского резонатора при $\frac{R}{L} \rightarrow \infty$, пучок на дзеркалах має достатньо велике значення, і значна частина потоку виходить за межі дзеркала при їх розумних розмірах, а це означає фактично неможливість формування в таких випадках гаусового пучка.



$$z_1 = 0.1575, \quad z_2 = 0.1575, \quad w_0 = 1.49454 \times 10^{-7}, \quad w_1 = 0.2113319, \quad w_2 = 0.21133, \quad z_0 = 1.11384 \times 10^{-7},$$

$$W(1 \cdot z_0) = 2.11359 \times 10^{-7}, \quad W(0.319) = 0.42803, \quad R(1 \cdot z_0) = 2.22767 \times 10^{-7}, \quad R(0.319) = 0.319$$

напівконфокальний резонатор $g_1=0.5, g_2=1$

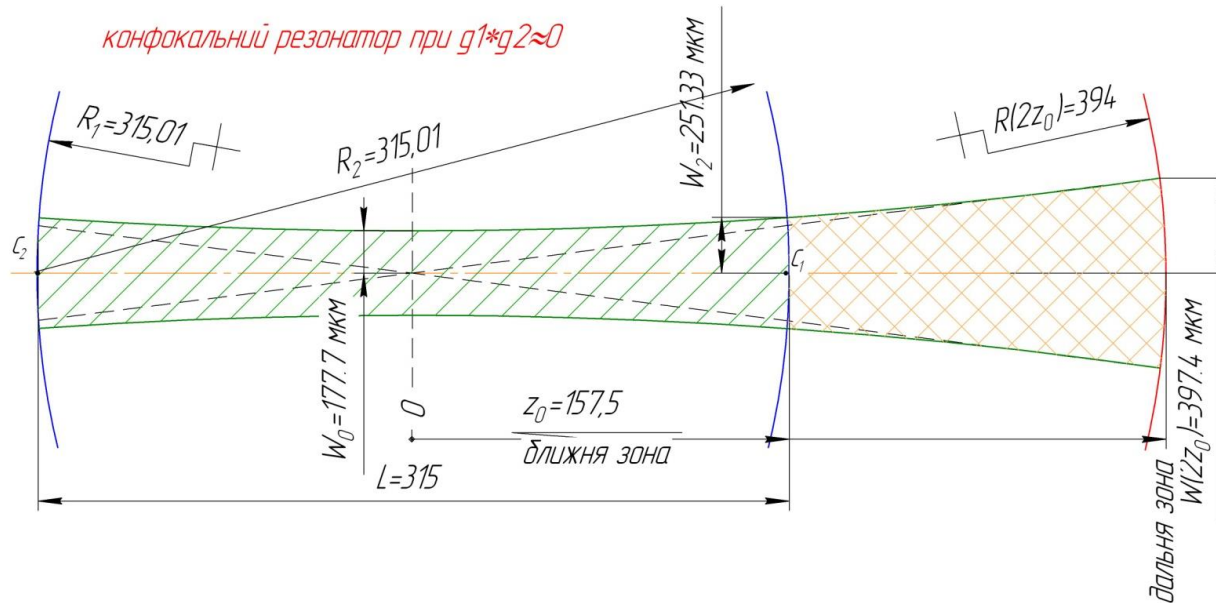


$$z_1 = 0.314968, \quad z_2 = 3.15 \times 10^{-5}, \quad W_0 = 2.51334 \times 10^{-4}, \quad W_1 = 3.55431 \times 10^{-5}, \quad W_2 = 2.51327 \times 10^{-3}, \quad Z_0 = 0.315, \\ W(1Z_0) = 3.55439 \times 10^{-4}, \quad R(1Z_0) = 0.63$$

Завдання 2. Розрахувати оптичну систему та параметри перетвореного лазерного пучка конфокального резонатора при $f' \leq \frac{R}{2}$

Початковий лазерний пучок

1-8. Розрахунок оптичного резонатора див. завдання 1



Оптична система

9. Визначаємо конфокальний параметр R_e' перетвореного пучка із виразу

$$2 \cdot W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}} \Rightarrow R_e' = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_0'^2}{\lambda} \text{ за заданим значенням діаметру перетяжки } W_0'$$

Оцінимо доцільність використання такої оптичної системи, якщо необхідно отримати перетворений пучок збільшений в 2 рази, тобто при $W_0' = 2W_0 = 3,554 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $R_e' = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_0'^2}{\lambda} = 1,26$

10. Приймаємо фокусну відстань рівною $f' \leq \frac{R}{2} = 0,1574499 \text{ м}$.

11. Визначаємо фокусну відстань f' оптичної системи із виразу $R_e' = \frac{R_e}{\left(1 + \frac{a}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f'}\right)^2} \Rightarrow f'$ (відстань a або z

вибирають із конструктивних міркувань), але повинна виконуватися умова $f' \leq \frac{R}{2}$.

Приймаємо відстань a на якій буде розташовуватися оптична система. Регулюванням цієї відстані можна незначно збільшувати або зменшувати діаметр перетяжки перетвореного пучка. Змінюючи відстань a необхідно кожен раз порівнювати отримане значення задньої фокусної відстані f' із фокусною відстанню яку ми прийняли.

$-a = 1,01 \cdot Z_0 = 0,159 \text{ м}$	$f' = 0,12721 \text{ м}$	Можна використовувати
$-a = 1,1 \cdot Z_0 = 0,1731 \text{ м}$	$f' = 0,13855 \text{ м}$	
$-a = 1,2 \cdot Z_0 = 0,1889 \text{ м}$	$f' = 0,15115 \text{ м}$	
$-a = 1,25 \cdot Z_0 = 0,19681 \text{ м}$	$f' = 0,1574499 \text{ м}$	
$-a = 1,3 \cdot Z_0 = 0,20468 \text{ м}$	$f' = 0,16374 \text{ м}$	Не можна використовувати

12. Визначаємо діаметр вхідної зіниці за формулою $W(Z) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z}{2 \cdot k \cdot W_0^2}\right)^2\right]}$ з урахуванням, що $D \geq 2 \cdot W_{1(2)}$

При $a = 1,25 \cdot Z = 0,19681 \text{ м}$, $W(a) = 2,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Приймаємо $D = 5,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

13. Визначаємо положення a' або z' перетяжки перетвореного

пучка за формулою
$$1 - \frac{a'}{f'} = \frac{1 + \frac{a}{f'}}{\left(1 + \frac{a}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f'}\right)^2} \Rightarrow a'$$

$-a = 1,01 \cdot Z_0 = 0,159 \text{ м}$	$a' = 0,15902 \text{ м}$
$-a = 1,1 \cdot Z_0 = 0,1731 \text{ м}$	$a' = 0,17303 \text{ м}$
$-a = 1,2 \cdot Z_0 = 0,1889 \text{ м}$	$a' = 0,18772 \text{ м}$
$-a = 1,25 \cdot Z_0 = 0,19681 \text{ м}$	$a' = 0,19449 \text{ м}$

14. Перетворений конфокальний параметр резонатора при заданих $-a = 1,01 \cdot Z_0; 1,1 \cdot Z_0; 1,2 \cdot Z_0; 1,25 \cdot Z_0$

$$R_e' = \frac{R_e}{\left(1 + \frac{a}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f'}\right)^2} = -0,314; 0,3117; 0,302; 0,296$$

Перетворений лазерний пучок

15. Радіус перетвореного хвильового фронту

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{f'} \Rightarrow R' = \frac{R \cdot f'}{R + f'}$$

$-a = 1,01 \cdot Z_0 = 0,159 \text{ м}$	$R' = 0,1049 \text{ м}$
$-a = 1,1 \cdot Z_0 = 0,1731 \text{ м}$	$R' = 0,1051 \text{ м}$
$-a = 1,2 \cdot Z_0 = 0,1889 \text{ м}$	$R' = 0,1055 \text{ м}$
$-a = 1,25 \cdot Z_0 = 0,19681 \text{ м}$	$R' = 0,1058 \text{ м}$

16. Діаметр перетяжки і кут розходження перетвореного пучка відповідно:

$$2 \cdot W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}} \Rightarrow W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}}; \quad 2 \cdot \omega' = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e'}} \Rightarrow \omega' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e'}}$$

17. Лінійне у кутове збільшення в перетяжках відповідно: $\beta_n = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0} = \sqrt{\frac{R_e'}{R_e}}$; $\gamma_n = \frac{\omega'}{\omega}$

18. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка $Z_0' = \frac{\pi \cdot (W_0')^2}{\lambda}$.

19. Розмір пучка на границі ближньої і дальньої зони W_{Z_0}' :

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z_0}{k \cdot W_0'^2} \right)^2 \right]}$$

Відстань від резонатора до оптичної системи	Результати розрахунків					
	$W_0', м$	$\omega', ^\circ$	β_n	γ_n	$Z_0', м$	$W_{Z_0}', м$
$-a = 1,01 \cdot Z_0 = 0.159 м$	$1,7768 \cdot 10^{-4}$	$0,0646^\circ$	0,9999	1	0,15743	$2,512 \cdot 10^{-4}$
$-a = 1,1 \cdot Z_0 = 0.1731 м$	$1,768 \cdot 10^{-4}$	$0,0649^\circ$	0,995	1,004	0,15589	$2,500 \cdot 10^{-4}$
$-a = 1,2 \cdot Z_0 = 0.1889 м$	$1,742 \cdot 10^{-4}$	$0,0659^\circ$	0,98	1,01	0,15139	$2,464 \cdot 10^{-4}$
$-a = 1,25 \cdot Z_0 = 0.19681 м$	$1,723 \cdot 10^{-4}$	$0,0666^\circ$	0,978	1,03	0,14818	$2,437 \cdot 10^{-4}$

Висновок: доцільність та межі використання такої оптичної систем

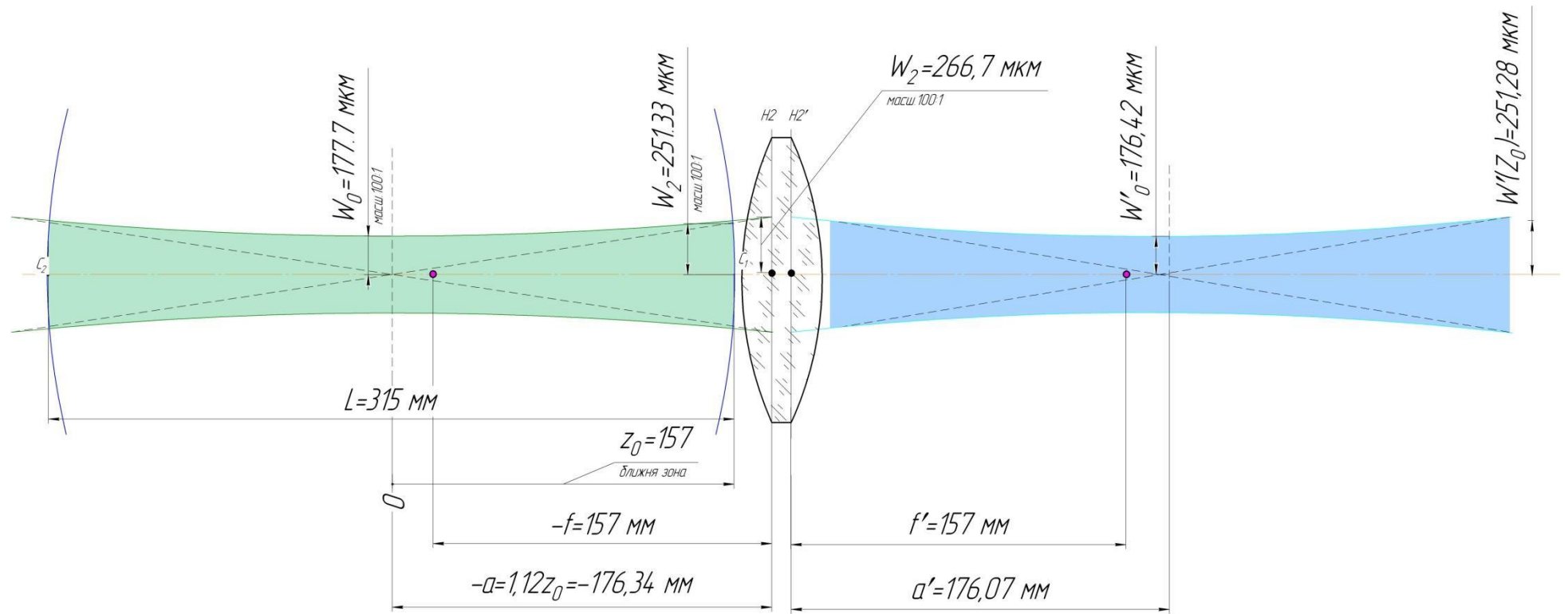
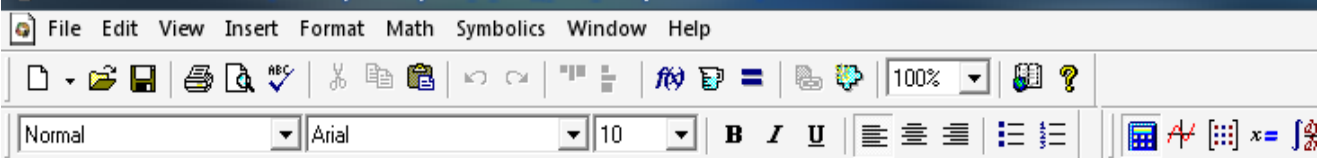


Рисунок 4.6 - Перетворення гаусового пучка тонкою лінзою при $f' \leq \frac{R}{2} = 157 \text{ мм}$



Завдання 2. Розрахувати оптичну систему та параметри перетвореного лазерного пучка при

$$f' \leq \frac{R}{2}$$

9. Визначаємо конфокальний параметр RRe перетвореного пучка із виразу

$$2 \cdot W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}} \Rightarrow R_e' = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_0'^2}{\lambda}$$

за заданим значенням радіусу перетяжки WW0. Приймаємо WW0 := 2 · W0 WW0 = 3.55445081 × 10⁻⁴

$$RRe := 2 \cdot WW0^2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \quad RRe = 1.26004001$$

10. Приймаємо фокусну відстань

$$ff := \frac{R((1-20))}{2}$$

$$ff = 0.157505$$

11. Визначаємо фокусну відстань ff оптичної системи із виразу

$$R_e' = \frac{R_e}{\left(1 + \frac{a}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f'}\right)^2} \Rightarrow f' = \left[\frac{1}{2 \cdot (4 \cdot RRe - 4 \cdot Re)} \left[-8 \cdot RRe \cdot a + 4 \cdot \left(-RRe^2 \cdot Re^2 + 4 \cdot Re \cdot RRe \cdot a^2 + RRe \cdot Re^3 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right] \left[\frac{1}{2 \cdot (4 \cdot RRe - 4 \cdot Re)} \left[-8 \cdot RRe \cdot a - 4 \cdot \left(-RRe^2 \cdot Re^2 + 4 \cdot Re \cdot RRe \cdot a^2 + RRe \cdot Re^3 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right]$$

Приймаємо відстань *a* на якій буде розташовуватися оптична система. Регулюванням цієї відстані можна незначно збільшувати або зменшувати діаметр перетяжки перетвореного пучка. Змінюючи відстань *a* необхідно кожен раз порівнювати отримане значення задньої фокусної відстані із фокусною відстанню яку ми прийняли.

i := 1..5

$$ff_1 := \frac{1}{2 \cdot (4 \cdot RRe - 4 \cdot Re)} \left[-8 \cdot RRe \cdot a_1 + 4 \cdot \left[-RRe^2 \cdot Re^2 + 4 \cdot Re \cdot RRe \cdot (a_1)^2 + RRe \cdot Re^3 \right]^{\frac{1}{2}} \right]$$

ff ₁ =
0.12726404+0.15458103i
0.14112448+0.15756043i
0.1512048+0.15988115i
0.157505+0.1613946i
0.1638052+0.16295489i

a ₁ :=	a ₁ =
-1.01·20	-0.15908005
-1.12·20	-0.1764056
-1.2·20	-0.189006
-1.25·20	-0.19688125
-1.3·20	-0.2047565

Таким чином змінювати відстань *a* можна тільки в тих межах де виконується умова

$$f' \leq \frac{R}{2}$$

12. Визначаємо діаметр вхідного зрачка з урахуванням

$$D \geq 2 \cdot W_{1(2)}$$

на відстані $Z=a$ радіус перетяжки пучка складає
 приймаємо діаметр

$$D_1 := 2 \cdot W(a_1) \quad D_1 =$$

5.05194883·10 ⁻⁴
5.33688687·10 ⁻⁴
5.55222966·10 ⁻⁴
5.68989754·10 ⁻⁴
5.82973279·10 ⁻⁴

$$W(a_1) =$$

2.52597442·10 ⁻⁴
2.66844343·10 ⁻⁴
2.77611483·10 ⁻⁴
2.84494877·10 ⁻⁴
2.91486639·10 ⁻⁴

13. Визначаємо положення aa перетяжки перетвореного пучка за формулою

$$1 - \frac{a'}{f'} = \frac{1 + \frac{a}{f'}}{\left(1 + \frac{a}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f'}\right)^2} \Rightarrow a'$$

$$aa_1 := \frac{\left[4 \cdot \text{fff} \cdot a_1 + 4 \cdot (a_1)^2 + \text{Re}^2\right]}{\left[4 \cdot \text{fff}^2 + 8 \cdot \text{fff} \cdot a_1 + 4 \cdot (a_1)^2 + \text{Re}^2\right]} \cdot \text{fff}$$

$$aa_1 =$$

0.15907989
0.1761373
0.18779443
0.194565
0.200855

14. Перетворений конфокальний параметр резонатора при заданих a та ff

$$R_e' = \frac{R_e}{\left(1 + \frac{a}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f'}\right)^2}$$

$$\text{RR}_{e_1} := \frac{\text{Re}}{\left(1 + \frac{a_1}{\text{fff}}\right)^2 + \left(\frac{\text{Re}}{2 \cdot \text{fff}}\right)^2}$$

$$\text{RR}_{e_1} =$$

-0.31497851
-0.31053825
-0.30289423
-0.29648
-0.289

15. Радіус перетвореного хвильового фронту

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{f'} \Rightarrow R' = \frac{R \cdot f'}{R + f'}$$

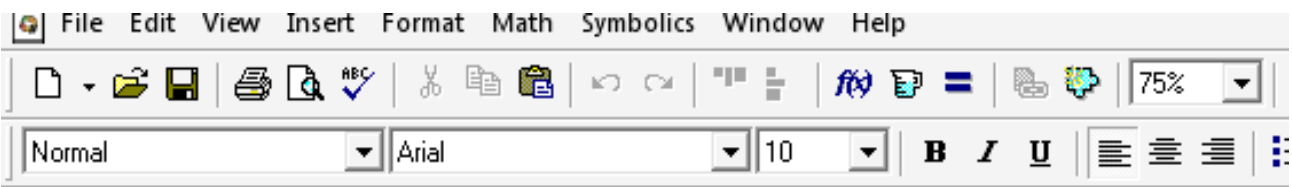
можна визначити в будь якій точці z. При $Z=1.11 \cdot Z_0$;
 $1.5 \cdot Z_0$; $2.005 \cdot Z_0$; $2.5 \cdot Z_0$

$$\left[\frac{\text{fff}}{\text{fff} + R \cdot (-a)_i} \right]$$

$$\text{RR}_i =$$

0.10500507
0.10522738
0.10558028
0.10586402
0.10618758

16. Діаметр перетяжки і кут розходження перетвореного пучка відповідно



16. Діаметр перетяжки і кут розходження перетвореного пучка відповідно 0.10618758

$$2 \cdot W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_c'}{\pi}} \Rightarrow W_0' = \frac{\sqrt{2 \cdot \lambda \cdot R_c'}}{2}$$

$$ww_0_1 := \frac{\left(\frac{2 \cdot \lambda \cdot |RRe_1|}{\pi} \right)}{2}$$

ww₀₁ -

1.77713655 · 10 ⁻⁴
1.76456594 · 10 ⁻⁴
1.74271289 · 10 ⁻⁴
1.7241619 · 10 ⁻⁴
1.70227321 · 10 ⁻⁴

$$2 \cdot \omega' = 2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \lambda}}{\sqrt{\pi \cdot R_c'}} \Rightarrow \omega' = \frac{\sqrt{2 \cdot \lambda}}{\sqrt{\pi \cdot R_c'}}$$

$$\omega\omega_1 := \left(\frac{\sqrt{2 \cdot \lambda}}{\sqrt{\pi \cdot |RRe_1|}} \right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

ωω₁ -

0.06465357
0.06511416
0.06593067
0.06664004
0.06749693

17. Лінійне і кутове збільшення в перетяжках

$$\beta_n = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0} = \sqrt{\frac{R_c'}{R_c}}$$

$$\beta_{P1} := \frac{ww_0_1}{w_0}$$

β_{P1} -

0.99995
0.99287684
0.98058068
0.9701425
0.95782629

$$\gamma_n = \frac{\omega'}{\omega}$$

$$\beta_i := \frac{\omega\omega_1}{\omega}$$

β_i -

1.00005
1.00717426
1.0198039
1.03077641
1.04403065

18. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка

$$Z_0' = \frac{w_0'^2}{\lambda}$$

$$\frac{w_0_1^2}{\lambda}$$

$$ZZ_0_1 -$$

0.15748925
0.15526913
0.15144712
0.14824
0.1445

19. Розмір пучка на границі ближньої та дальньої зони визначаємо за загальною формулою

$$W(Z) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z}{k \cdot W_0^2} \right)^2 \right]}$$

$$ww_1 := \sqrt{(ww_0_1)^2 \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot ZZ_0_1}{2k \cdot (ww_0_1)^2} \right]}$$

$$ww_1 -$$

2.51325061 · 10 ⁻⁴
2.49547309 · 10 ⁻⁴
2.4645682 · 10 ⁻⁴
2.43833314 · 10 ⁻⁴
2.40737786 · 10 ⁻⁴

Висновок. Як видно із розрахунків при використанні оптичної системи із $f' \leq \frac{\lambda}{2}$

маємо значення лінійного коефіцієнту збільшення =1, це означає, що лазерний пучок майже без змін перетворюється оптичною системою. При використанні декількох лінз утворюється лазерний хвильопровід. При цьому маємо майже незначні можливості для регулювання перетяжки лазерного променя.

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Класифікація резонаторів.
2. Умова стійкості резонатора. Діаграма стійкості.
3. Навести ескіз резонатора для VII області стійкості.
4. Основні параметри гаусового пучка.
5. Поняття «ближньої» та «дальньої» зони дифракції.
6. Зобразити форму гаусового пучка у резонаторі із сферичними дзеркалами.
7. Який конструктивний параметр резонатора впливає на розмір перетяжки пучка та розмір пучка на дзеркалах.
8. Зобразити перетворення лазерного променя від'ємною тонкою лінзою.
9. Зобразити перетворення лазерного променя додатною тонкою лінзою.

Література

1. Тимчик Г.С. Лазерні технології. Практикум: Навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Автоматизація та укомп'ютерно-інтегровані технології в приладобудуванні» спеціальності 152 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»/ Укл. Г.С.Тимчик , Г.В.Богатирьова, М.С. Мамута. Електронне мережеве видання. – Київ: КПІ ім.Шгоря Сікорського, 2022. – 124 с.
2. Мачехін Ю.П., Гнатенко О.С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч.2.Параметри лазерного випромінювання. Харків:» Факт», 2021. 145 с.
3. Мохунь І.І., Вікторовська Ю.Ю., Галушко Ю.К. Оптичні технології в інформаційній техніці. – Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2021. – 301 с.
4. ДСТУ ISO 11145:2005 Оптика та оптичні прилади. Лазери і лазерна апаратура. Словник термінів та умовні позначки (ISO 11145:2001, IDT).
5. ДСТУ ISO 11554:2005 Оптика та оптичні прилади. Лазери й лазерна апаратура. Методи випробування потужності, енергії та часових характеристик лазерного пучка (ISO 11554:2003, IDT).
6. ДСТУ ISO 13694:2009 Оптика й оптичні прилади. Лазери та лазерна апаратура. Методи випробування для визначення розподілу густини потужності (енергії) лазерного пучка (ISO 13694:2000, IDT).
7. ДСТУ ISO 12005:2005 Лазери і лазерна апаратура. Методи випробування параметрів лазерного пучка. Поляризація (ISO 12005:2003, IDT).

ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

ФОТОЕЛЕКТРИЧНА ОПТИЧНА СИСТЕМА З ЛАЗЕРОМ

Мета роботи:

1. Здійснити розрахунок двокомпонентної випромінювальної насадки для лазерної системи, яка формує паралельний пучок світла.
2. Здійснити енергетичний розрахунок створеної оптичної системи.

1. Підготовка до роботи

При підготовці до роботи вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Оптична схема для фокусування лазерного випромінювання.
2. Умова стійкості оптичного резонатора.
3. Параметри гаусового пучка.
4. Перетворення лазерного променя позитивною тонкою лінзою.
5. Перетворення лазерного променя від'ємною тонкою лінзою.
6. Оптичні системи для зменшення розходження променів лазера.
7. Основні характеристики афокальної насадки для лазера.

2. Теоретичні відомості

Розглянемо особливості розрахунку фотоелектричної системи, яка містить лазер як джерело випромінювання. Оптична система складається із передавальної частини, яка містить лазер 1 і афокальну насадку 2, і приймальної частини – об'єктив 3 і фотоприймач 4.

Передавальна частина призначена для утворення вузько спрямованого потоку випромінювання з необхідним кутом розходження пучка променів в напрямку об'єкту. Приймальна частина слугує для перетворення відбитого від об'єкта потоку випромінювання в електричний сигнал.

Для зменшення кута розходження лазерних пучків використовують двокомпонентні лінзова або дзеркальні насадки, які складаються із першого від'ємного та другого додатного компонентів рис.5.1.

Основні характеристики афокальної насадки для лазера є:

- Кутове збільшення γ ;
- Кутове поле $2 \cdot \omega'$;
- Діаметр вихідної зіниці D (дорівнює діаметру вихідного торця лазера та діаметру перетяжки пучка);
- Положення вхідної зіниці a_p відносно першого компонента (визначається відрізком a_1 від перетяжки лазера до першого компонента);
- Довжина насадки $L = f'_1 + f'_2$;
- Довжина хвилі лазерного випромінювання λ .

Кутове збільшення γ розраховують за формулою [2, 4]:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \omega'}{2 \cdot \omega} = \frac{2 \cdot W_0}{2 \cdot W_0'} = \sqrt{\frac{R_e}{R_e'}} \quad (5.1)$$

де R_e - конфокальний параметр резонатора;

R_e' - перетворений конфокальний параметр резонатора;

$2 \cdot \omega'$ - кутове поле, визначається кутом розходження пучків в просторі зображення.

Для забезпечення мінімального розходження пучка після оптичної системи необхідно сумістити перетяжку пучка, перетвореного першим компонентом, з передньою фокальною площиною другого компонента. Відстань Δ (оптичний інтервал), що визначає зміщення заднього фокуса першого компонента відносно переднього фокуса другого компонента, визначається [2, 4]:

$$\Delta = z_1' = \frac{z_1}{\left(\frac{z_1}{f_1'}\right)^2 + \left(\frac{R_{e1}}{2 \cdot f_1'}\right)^2} \quad (5.2)$$

Кутове збільшення γ_Δ розфокусованої системи:

$$\gamma_\Delta = \sqrt{\frac{R_{e1}}{R_{e2}}} = \frac{R_{e1} \cdot f_1'}{f_2' \cdot \sqrt{4 \cdot z_1'^2 + R_{e1}^2}} \quad (5.3)$$

При $\Delta = 0$ кутове збільшення афокальної насадки визначається залежністю:

$$\gamma = -\frac{f_1'}{f_2'} \quad (5.4)$$

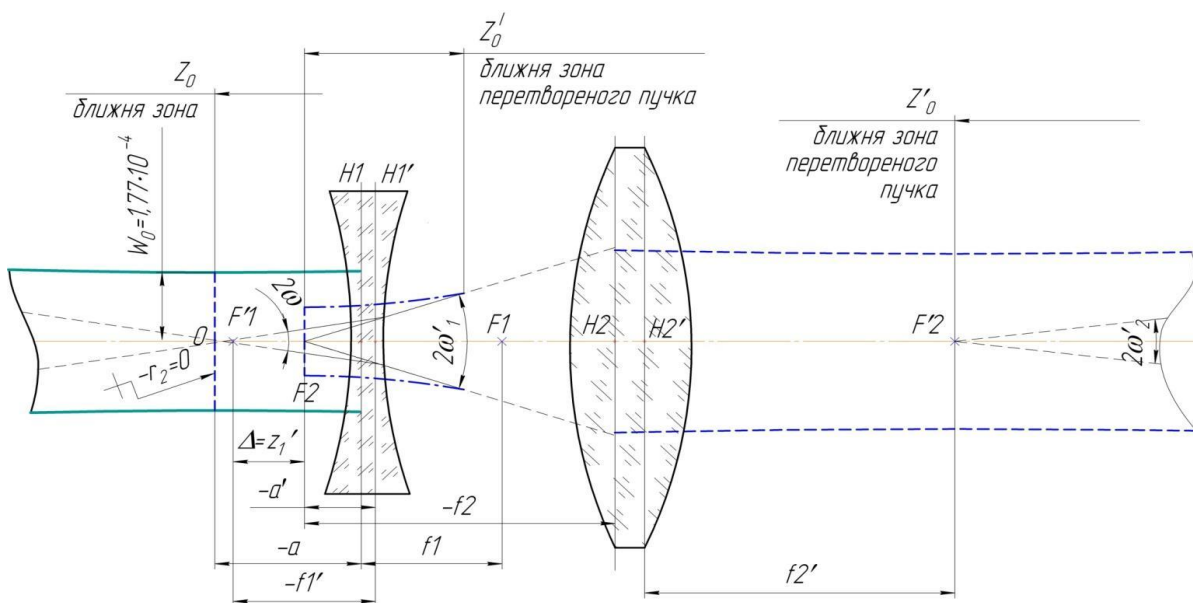


Рисунок 5.1 - Двокомпонентна оптична насадка для лазерного джерела

В цьому розділі розглянуто перетворення лазерних пучків тільки в гаусовому наближенні. Оптична система вважається ідеальною, якщо вхідний пучок знову перетворюється в гаусів пучок. Це можливо тільки при умові, що оптична система не вносить додаткових викривлень у форму хвильового фронту.

Діаметр освітленої плями на об'єкті:

$$d_n = 2 \cdot \omega' \cdot p \quad (5.5)$$

де $2 \cdot \omega'$ - кут розходження пучка променів лазера після насадки;

p - відстань до об'єкта.

Енергетична сила світла в напрямку оптичної осі передавальної частини визначається за формулою:

$$I_e = \tau_{o.c1} \cdot \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad (5.6)$$

де Φ_e - потік випромінювання лазера;

$\Omega = \pi \cdot \omega'^2$ - тілесний кут розходження пучка променів після насадки;

$\tau_{o.c1}$ - коефіцієнт пропускання афокальної насадки.

Енергетична освітленість об'єкту, отримана за допомогою передавальної частини:

$$E_e = \tau_a \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{I_e}{p^2} \quad (5.7)$$

де τ_a - коефіцієнт пропускання атмосфери на відстані p ;

α - кут між напрямком пучка променів і нормаллю до поверхні об'єкту.

Енергетична яскравість освітленого об'єкта як вторинного джерела

Енергетична сила світла I'_e , відбитого об'єктом випромінювання, визначається у відповідності з виразом:

$$I'_e = B_e \cdot \cos(\alpha) \cdot S_2 \quad (5.9)$$

де $S_2 = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4}$ - площа освітленої частини поверхні об'єкту.

Потік випромінювання, який поступає від об'єкту на вхідну зіницю об'єктиву приймаючої частини з діаметром D :

$$\Phi'_e = E'_e \cdot S_{вх.зр} \quad (5.10)$$

де $E'_e = \tau_a \cdot \frac{I'_e}{p^2}$ - енергетична освітленість вхідної зіниці об'єктиву;

де $S_2 = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4}$ - площа освітленої частини поверхні об'єкту.

Потік випромінювання, який поступає від об'єкта на вхідну зіницю об'єктиву приймальної частини з діаметром D :

$$\Phi'_e = E'_e \cdot S_{вх.зр} \quad (5.10)$$

де $E'_e = \tau_a \cdot \frac{I'_e}{r^2}$ - енергетична освітленість вхідної зіниці об'єктиву;

$S_{вх.зр} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці.

На фотоприймач поступає потік випромінювання:

$$\Phi''_e = \tau_{o.c2} \cdot \Phi'_e \quad (5.11)$$

де $\tau_{o.c2}$ - коефіцієнт пропускання приймальної частини.

З урахуванням залежностей (5.6) - (5.10) формулу (5.11) можна записати в наступному вигляді:

$$\Phi''_e = \frac{\tau_{o.c1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{o.c2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot D^2}{4 \cdot \pi \cdot \omega'^2 \cdot r^4} \Phi_e \quad (5.12)$$

Для надійної роботи приймальної частини необхідно, щоб значення потоку випромінювання Φ''_e , який поступає на приймач, перевищував значення граничного потоку $\Phi_{e гр.}$ приймача:

$$\Phi''_e = k \cdot \Phi_{e гр.} \quad (5.13)$$

де k - необхідне співвідношення сигнал/шум.

Вирази (5.12) і (5.13) дозволяють визначити діаметр вхідної зіниці приймальної частини, який забезпечує отримання на приймачі необхідного потоку випромінювання при відомій відстані r від системи до об'єкта:

$$D \geq 2 \cdot \omega' \cdot r^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot \Phi_{e гр.}}{\tau_{o.c1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{o.c2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \Phi_e}} \quad (5.14)$$

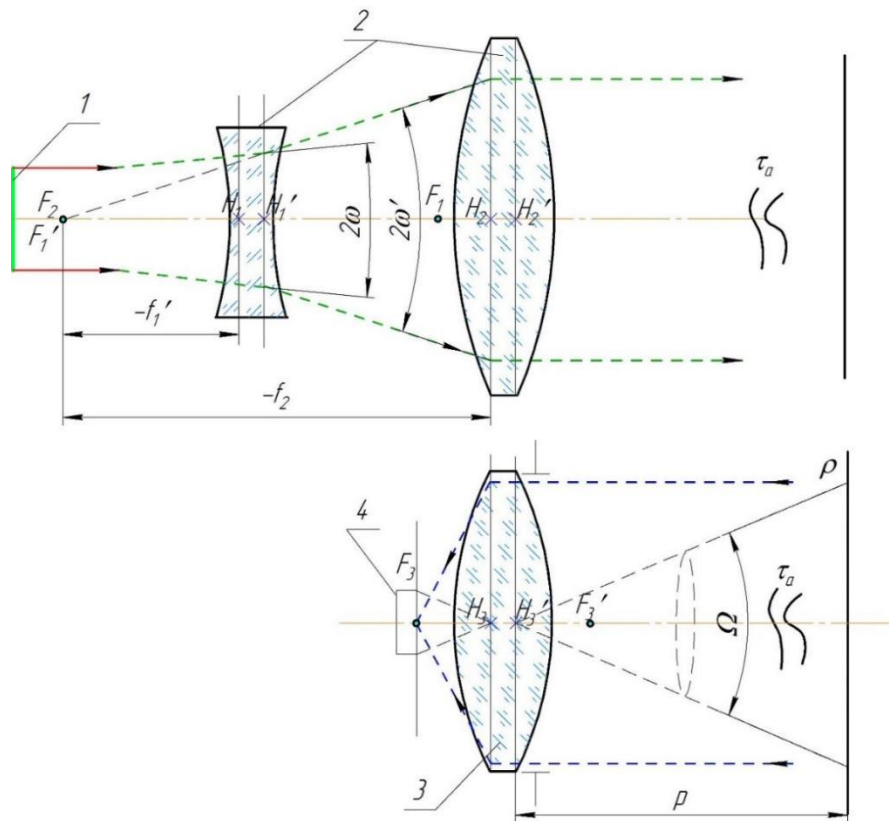


Рисунок 5.2 - Схема оптичної фотоелектричної системи з лазером

3. Виконання роботи

Завдання 1 Використовуючи джерело випромінювання із ПЗ№4 (із всіма необхідними розрахунковими параметрами) розрахувати двокомпонентну випромінювальну насадку, яка дає на виході паралельний пучок променів.

Дано:

- діаметр (радіус) перетяжки лазерного променя $W_0 = 177.7 \text{ мкм}$;
- конфокальний параметр лазерного променя $R_e = -0.31501 \text{ м}$;
- необхідний діаметр (радіус) перетяжки на виході двокомпонентної насадки $W'_0 = W_2' = 260.64 \text{ мкм}$.

Розрахунок оптичної насадки (двокомпонентної)

1. Визначаємо кутове та лінійне збільшення в перетяжках розраховують за формулою:

$$\gamma_n = \frac{2 \cdot \omega'}{2 \cdot \omega} = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0} = \sqrt{\frac{R_e'}{R_e}}; \quad \beta_n = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0}$$

2. Визначаємо перетворений (оптичною насадкою) конфокальний параметр резонатора:

$$2 \cdot W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}} \Rightarrow R_e' = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_0'^2}{\lambda}$$

Перевіряємо кутове збільшення за формулою:

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_e}{R_e'}}.$$

3. Приймаємо фокусну відстань першого елемента рівною $f_1' \leq R = 0,35101$ м. Приймаємо $f_1' = -0,314899$ м.

4. Задаємо відстань a_1 на якій буде розташовуватися перший оптичний елемент відносно перетяжки лазерного променя. Межу регулювання даної відстані див.приклад 4.2. Приймаємо $-a_1 = 1,11 \cdot Z_0 = 0,1748$ м.

Визначаємо діаметр вхідної зіниці за формулою $D \geq 2 \cdot W_{1(2)}$ з урахуванням, що розмір променя на передній головній площині першого елемента:

$$W(a_1) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a_1}{2 \cdot k \cdot W_0^2} \right)^2 \right]}.$$

5. Визначаємо відстань Δ (оптичний інтервал), що визначає зміщення заднього фокуса першого компонента відносно переднього фокуса другого компонента за формулою:

$$\Delta = z_1' = \frac{z_1}{\left(\frac{z_1}{f_1'} \right)^2 + \left(\frac{R_{e1}}{2 \cdot f_1'} \right)^2},$$

де $z_1 = a_1 + f_1'$, $R_{e1} = R_e$

6. Конфокальний параметр R_{e1}' пучка, перетвореного першим компонентом визначають за формулою:

$$R_{e1}' = \frac{R_{e1}}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1'} \right)^2 + \left(\frac{R_{e1}}{2 \cdot f_1'} \right)^2}.$$

7. Діаметр (радіус) перетяжки пучка, перетвореного першим компонентом:

$$W1_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_{e1}'}{\pi}}.$$

8. Визначаємо положення a_1' перетяжки перетвореного пучка першим компонентом із формули:

$$1 - \frac{a_1'}{f_1'} = \frac{1 + \frac{a_1}{f_1'}}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1'}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot f_1'}\right)^2} \Rightarrow a_1'.$$

9. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка :

$$Z1_0' = \frac{\pi \cdot (W1_0')^2}{\lambda}.$$

10. Розмір пучка на границі ближньої і дальньої зони W'_{Z_0} :

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z1_0}{k \cdot W_0'^2}\right)^2\right]}$$

11. Визначаємо фокусну відстань другого компонента із формули:

$$f_2' = \frac{f_1' \cdot R_{e1}}{\gamma_{\Delta} \cdot \sqrt{4 \cdot z_1^2 + R_{e1}^2}}.$$

12. Визначаємо діаметр D_2 другого компоненту за формулою:

$$D_2 \geq 2 \cdot W1_0' \cdot \sqrt{1 + \xi_2^2}, \text{ де } \xi_2 = -\frac{2 \cdot f_2'}{R_{e1}}$$

13. Визначаємо положення a_2' перетяжки перетвореного пучка другим компонентом із формули:

$$1 - \frac{a_2'}{f_2'} = \frac{1 + \frac{a_2}{f_2'}}{\left(1 + \frac{a_2}{f_2'}\right)^2 + \left(\frac{R_{e1}}{2 \cdot f_2'}\right)^2} \Rightarrow a_2'$$

14. Розмір променя на передній головній площині другого елементу:

$$W(a_2) = \sqrt{W1_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a_2}{2 \cdot k \cdot W1_0'^2}\right)^2\right]}$$

15. Кут розходження перетвореного пучка:

$$2 \cdot \omega' = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e'}} \Rightarrow \omega' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e'}}$$

16. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка :

$$Z_{2_0}' = \frac{\pi \cdot (W_{2_0}')^2}{\lambda}$$

17. Розмір пучка на границі ближньої і дальньої зони W_{Z_0}' :

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z_0}{k \cdot W_0'^2} \right)^2 \right]}$$

Енергетичний розрахунок

18. Діаметр освітленої плями на об'єкті:

$$d_n = 2 \cdot \omega' \cdot p,$$

де $2 \cdot \omega'$ - кут розходження пучка променів лазера після насадки;
 p - відстань до об'єкта.

19. Енергетична сила світла в напрямку оптичної осі передавальної частини визначається за формулою:

$$I_e = \tau_{o.c1} \cdot \frac{\Phi_e}{\Omega},$$

де Φ_e - потік випромінювання лазера (***вибираємо лазер із додатку з необхідною довжиною хвилі**) для $\lambda=0,63$ мкм підходить лазер ГН, ЛГН. Вибираємо лазер з максимальною потужністю випромінювання ЛГН-118-2В Р=10 мВт;

$\Omega = \pi \cdot \omega'^2$ - тілесний кут розходження пучка променів після насадки;

$\tau_{o.c1}$ - коефіцієнт пропускання афокальної насадки (0,98-0,99).

20. Енергетична освітленість об'єкту, отримана за допомогою передавальної частини:

$$E_e = \tau_a \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{I_e}{p^2},$$

де τ_a - коефіцієнт пропускання атмосфери на відстані p (0,9-0,95);

α - кут між напрямком пучка променів і нормаллю до поверхні об'єкту.

21. Енергетична яскравість освітленого об'єкта як вторинного джерела випромінювання визначається за формулою:

$$B_e = \rho \cdot \frac{E_e}{\pi},$$

де ρ - коефіцієнт дифузного відбиття поверхні об'єкту (0,5-0,75).

22. Енергетична сила світла I'_e , відбитого об'єктом випромінювання, визначається згідно з виразом:

$$I'_e = B_e \cdot \cos(\alpha) \cdot S_2,$$

де $S_2 = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4}$ - площа освітленої частини поверхні об'єкту.

23. Потік випромінювання, який поступає від об'єкта на вхідну зіницю об'єктиву приймальної частини з діаметром D_3 :

$$\Phi'_e = E'_e \cdot S_{\text{вх.зр}},$$

де $E'_e = \tau_a \cdot \frac{I'_e}{r^2}$ - енергетична освітленість вхідної зіниці об'єктиву;

$S_{\text{вх.зр}} = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4}$ - площа вхідної зіниці;

$D \geq 2 \cdot \omega' \cdot r^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot \Phi_{e \text{ зр}}}{\tau_{o.c1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{o.c2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \Phi_e}}$ - діаметр вхідної

зіниці;

$\Phi_{e \text{ зр}}$ - граничний потік приймача, приймаємо приймач випромінювання

– фотодіод ФД256 (інтегральна спектральна чутливість $S_I = 6 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$, мінімально

допустимий струм фотоприймача $i_{\text{min}} \geq 0.005 \text{ мкА}$);

k - необхідне співвідношення сигнал/шум, приймаємо 10.

Тоді на приймач випромінювання поступає потік:

$$\Phi''_e = \tau_{o.c2} \cdot \Phi'_e$$

де $\tau_{o.c2}$ - коефіцієнт пропускання приймальної частини.

Приклад 5.2. Фотоелектрична оптична система з лазером

Використовуючи джерело випромінювання із прикладу 3.1 СРС (із всіма необхідними розрахунковими параметрами) розрахувати двокомпонентну випромінюючу насадку, яка дає на виході паралельний пучок променів.

Дано:

- діаметр (радіус) перетяжки лазерного променя $W_0 := (177.7 \cdot 10^{-6})$ $W_0 = 1.777 \times 10^{-4}$
- конфокальний параметр лазерного променя $Re := -0.31501$
- необхідний діаметр (радіус) перетяжки на виході двокомпонентної насадки $WW_02 := 260.64 \cdot 10^{-6}$

1. Визначаємо кутове та лінійне збільшення в перетяжках

$$\gamma = \frac{2 \cdot \omega'}{2 \cdot \omega} = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0} = \sqrt{\frac{R_e'}{R_e}}$$

$$\gamma := \frac{W_0}{WW_02} \quad \gamma = 0.6817833$$

$$\beta_n = \frac{2 \cdot W_0'}{2 \cdot W_0}$$

$$\beta := \frac{WW_02}{W_0} \quad \beta = 1.4667417$$

2. Визначаємо перетворений (оптичною насадкою) конфокальний параметр резонатора

$$2 \cdot W_0' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_e'}{\pi}} \Rightarrow R_e' = \frac{2 \cdot \pi \cdot W_0'^2}{\lambda}$$

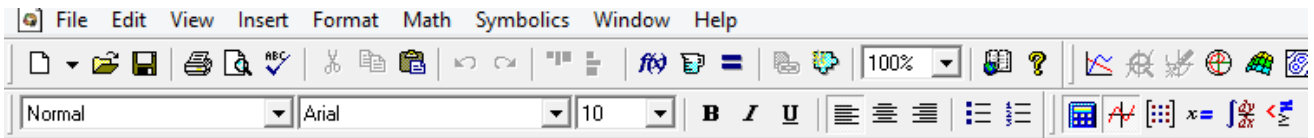
$$RRe := \frac{(WW_02)^2 \cdot 2\pi}{\lambda} \quad RRe = 0.67751896$$

Перевіряємо значення кутового збільшення

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_e'}{R_e}}$$

$$\gamma := \sqrt{\frac{|Re|}{RRe}} \quad \gamma = 0.68186978$$

3. Приймаємо фокусну відстань першого елемента $f_1' \leq R = 0,35101 \text{ м}$



3. Приймаємо фокусну відстань першого елементу $f_1' \leq R = 0,35101 \text{ м}$

$$R((1-Z_0)) = 0.31501 \quad \text{ff1} := -0.314899$$

4. Задаємо відстань a_1 на якій буде розташовуватися перший оптичний елемент відносно перетяжки лазерного променя. Межу регулювання даної відстані див.приклад 3.2.

Приймаємо $\hat{a}_1 := -1.11 \cdot Z_0 \quad \hat{a}_1 = -0.17483055$

$$W(a_1) = \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a_1}{2 \cdot k \cdot W_0^2} \right)^2 \right]}$$

$$W_{a1} := \sqrt{W_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{\hat{a}_1 \cdot 2}{2 \cdot k \cdot (W_0)^2} \right)^2 \right]}$$

$$W_{a1} = 2.65524789 \times 10^{-4}$$

$$D \geq 2 \cdot W_{1(2)}$$

$$D_1 := 2 \cdot W_{a1}$$

$$D_1 = 5.31049577 \times 10^{-4}$$

5. Визначаємо відстань (оптичний інтервал), що визначає зміщення заднього фокусу першого компонента відносно переднього фокусу другого компонента

$$\Delta = z_1' = \frac{z_1}{\left(\frac{z_1}{f_1'} \right)^2 + \left(\frac{R_{s1}}{2 \cdot f_1'} \right)^2}$$

$$z_1 = a_1 + f_1'$$

$$z_1 := \hat{a}_1 + \text{ff1} \quad z_1 = -0.48972955$$

$$\Delta := \frac{z_1}{\left(\frac{z_1}{\text{ff1}} \right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot \text{ff1}} \right)^2}$$

$$\Delta = -0.18350111$$

6. Конфокальний параметр R_{e1}' пучка, перетвореного першим компонентом

$$R_{e1}' = \frac{R_{s1}}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1'} \right)^2 + \left(\frac{R_{s1}}{2 \cdot f_1'} \right)^2}$$

$$\text{RRe1} := \frac{R_e}{\left(1 + \frac{\hat{a}_1}{\text{ff1}} \right)^2 + \left(\frac{R_e}{2 \cdot \text{ff1}} \right)^2}$$

$$\text{RRe1} = -0.11803389$$

7. Діаметр (радіус) перетяжки пучка, перетвореного першим компонентом

$$W_{10}' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot R_{e1}'}{\pi}}$$

$$\text{WW01} := \frac{\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot |\text{RRe1}|}{\pi}} \right)}{2}$$

$$\text{WW01} = 1.08788679 \times 10^{-4}$$

8. Визначаємо положення a_1' перетяжки перетвореного пучка першим компонентом

$$1 - \frac{a_1'}{f_1'} = \frac{1 + \frac{a_1}{f_1'}}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1'} \right)^2 + \left(\frac{R_{s1}}{2 \cdot f_1'} \right)^2} \Rightarrow a_1'$$

$$\text{aa1} := \frac{[4 \cdot \text{ff1} \cdot \hat{a}_1 + 4 \cdot (\hat{a}_1)^2 + R_e^2]}{[4 \cdot \text{ff1}^2 + 8 \cdot \text{ff1} \cdot \hat{a}_1 + 4 \cdot (\hat{a}_1)^2 + R_e^2]} \cdot \text{ff1}$$

$$\text{aa1} = -0.13139789$$

9. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка

9. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка

$$Z1_0 = \frac{\pi \cdot (W1_0')^2}{\lambda}$$

$$ZZ01 := \frac{\pi \cdot (WW01)^2}{\lambda} \quad ZZ01 = 0.05901695$$

10. Розмір пучка на границі ближньої та дальньої зони визначаємо за загальною формулою

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z_0}{k \cdot W_0'^2} \right)^2 \right]}$$

$$WW := \sqrt{(WW01)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot (ZZ01)}{2k \cdot (WW01)^2} \right)^2 \right]} \quad WW = 1.53850425 \times 10^{-4}$$

11. Визначаємо фокусну відстань другого компоненту

$$Re1 := Re$$

$$ff2 := \frac{ff1 \cdot Re1}{\gamma \cdot \sqrt{4 \cdot z1^2 + Re1^2}} \quad ff2 = 0.14139501$$

$$f_2' = \frac{f_1' \cdot R_{e1}}{\gamma_{\Delta} \cdot \sqrt{4 \cdot z_1^2 + R_{e1}^2}}$$

12. Визначаємо діаметр D2 другого компоненту

$$D_2 \geq 2 \cdot W1_0' \cdot \sqrt{1 + \xi_2^2}$$

$$\xi_2 = -\frac{2 \cdot f_2'}{R_{e1}}$$

$$D2 := 2 \cdot WW01 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{-2 \cdot ff2}{RRe1} \right)^2} \quad D2 = 5.64865245 \times 10^{-4}$$

13. Визначаємо положення a2' перетяжки перетвореного пучка другим компонентом

$$1 - \frac{a_2'}{f_2'} = \frac{1 + \frac{a_2}{f_2'}}{\left(1 + \frac{a_2}{f_2'} \right)^2 + \left(\frac{R_{e1}'}{2 \cdot f_2'} \right)^2} \Rightarrow a_2'$$

приймаємо відстань між першим та другим компонентом

$$d = 10 \cdot 10^{-3}$$

$$a2 := a1 - d \quad a2 = -0.14139789$$

$$aa2 := \frac{[4 \cdot ff2 \cdot a2 + 4 \cdot (a2)^2 + RRe1^2]}{[4 \cdot ff2^2 + 8 \cdot ff2 \cdot a2 + 4 \cdot (a2)^2 + RRe1^2]} \cdot ff2 \quad aa2 = 0.14141153$$

14. Розмір променя на передній головній площині другого елементу

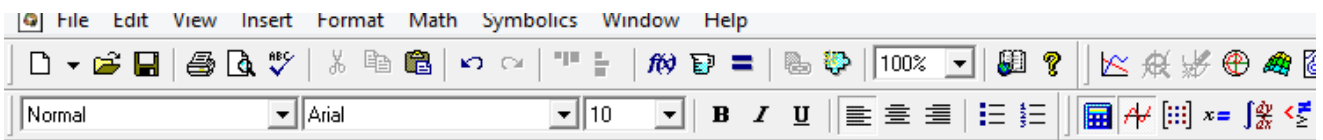
$$W(a_2) = \sqrt{W1_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot a_2}{2 \cdot k \cdot W1_0'^2} \right)^2 \right]}$$

$$Wa2 := \sqrt{WW01^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{a2 \cdot 2}{2 \cdot k \cdot (WW01)^2} \right)^2 \right]} \quad Wa2 = 2.82437517 \times 10^{-4}$$

15. Кут розходження перетвореного пучка відповідно

$$2 \cdot \omega' = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e}} \Rightarrow \omega' = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot R_e}}$$

$$\omega\omega := \left[\left(\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot |RRe|}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \omega\omega = 0.04408311$$



16. Величина дифракційного розходження перетвореного пучка

$$ZZ_0 = \frac{\pi \cdot (W_0')^2}{\lambda}$$

$$ZZ_0 := \frac{\pi \cdot (WW_0)^2}{\lambda} \quad ZZ_0 = 0.33875948$$

17. Розмір пучка на границі ближньої та дальньої зони визначаємо за загальною формулою

$$W'(Z_0) = \sqrt{W_0'^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot Z_0}{k \cdot W_0'^2} \right)^2 \right]}$$

$$WW := \sqrt{(WW_0)^2 \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (ZZ_0)}{2k \cdot (WW_0)^2} \right]} \quad WW = 3.68600623 \times 10^{-4}$$

Енергетичний розрахунок

18. Діаметр освітленої плями на об'єкті

$$d_n = 2 \cdot \omega' \cdot p$$

приймаємо відстань до об'єкту

$$p := 200 \cdot 10^{-3}$$

$$dp := 2 \cdot \omega \omega' \cdot p \quad dp = 0.01763324$$

19. Енергетична сила світла в напрямку оптичної вісі передавальної частини, Вт/ср

$$I_e = \tau_{0,c1} \cdot \frac{\Phi_e}{\Omega}$$

Φ_e - потік випромінювання лазера (вибираємо лазер з необхідною довжиною хвилі). Для $\lambda = 0,63$ мкм підходять лазери ГН, ЛГН. Вибираємо лазер з максимальною потужністю випромінювання ЛГН-118-2В, $P = 10$ мВт.

$$\Phi_e := 10 \cdot 10^{-3}$$

$$\tau_{0,c1} := 0.98$$

$$\Omega = \pi \cdot \omega^2$$

$$\Omega := \pi \cdot \omega \omega'^2$$

$$\Omega = 6.10512214 \times 10^{-3}$$

$$I_e := \tau_{0,c1} \cdot \frac{\Phi_e}{\Omega}$$

$$I_e = 1.60520949$$

20. Енергетична освітленість об'єкту, отримана за допомогою передавальної частини, Вт/м²

$$\tau_a := 0.95 \quad \alpha := 0$$

$$E_e = \tau_a \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{I_e}{p^2}$$

$$E_e := \tau_a \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{I_e}{p^2}$$

$$E_e = 38.12372538$$

21. Енергетична яскравість освітленого об'єкту, як вторинного джерела випромінювання

$$B_e = \rho \cdot \frac{E_e}{\pi}$$

$$\rho := 0.75$$

$$\hat{A} := \rho \cdot \frac{E_e}{\pi}$$

$$\hat{A} = 9.10136902$$

22. Енергетична сила світла I_e' , відбитого об'єктом випромінювання

22. Енергетична сила світла I'_e , відбитого об'єктом випромінювання

$$I'_e = B_e \cdot \cos(\alpha) \cdot S_2$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4}$$

$$S_2 := \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \quad S_2 = 2.44204886 \times 10^{-4}$$

$$P_e := \hat{A} \cdot \cos(\alpha) \cdot S_2 \quad P_e = 2.22259878 \times 10^{-3}$$

23. Потік випромінювання, який поступає від об'єкту на вхідний зрачок об'єктиву приймальної частини з діаметром D

$$D \geq 2 \cdot \omega \cdot p^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot \Phi_{e, \text{сп}}}{\tau_{O.C1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{O.C2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \Phi_e}}$$

$$it := 0.005 \cdot 10^{-6} \quad Si := 6 \cdot 10^{-3} \quad V_{\text{max}} := 680 \quad k := 10$$

$$F_{\text{egr}} := \frac{it}{Si \cdot V_{\text{max}}} \quad F_{\text{egr}} = 1.2254902 \times 10^{-9}$$

$$D_3 := 2 \cdot \omega \cdot p^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot k \cdot F_{\text{egr}}}{\tau_{O.C1} \cdot \tau_a^2 \cdot \tau_{O.C2} \cdot \rho \cdot S_2 \cdot \cos^2(\alpha) \cdot F_e}}$$

$$D_3 = 5.49205148 \times 10^{-4} \quad D_3 := 5 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{\text{ex,сп}} = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \quad \text{площа вхідного зрачка}$$

$$S_{\text{vzr}} := \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \quad S_{\text{vzr}} = 1.96349541 \times 10^{-5}$$

$$E'_e = \tau_a \cdot \frac{I'_e}{p^2} \quad \text{енергетична освітленість вхідного зрачка об'єктиву}$$

$$E_{\text{Ee}} := \tau_a \cdot \frac{P_e}{p^2} \quad E_{\text{Ee}} = 0.05278672$$

$$\Phi'_e = E'_e \cdot S_{\text{ex,сп}}$$

$$F_{\text{Fe}} := E_{\text{Ee}} \cdot S_{\text{vzr}} \quad F_{\text{Fe}} = 1.03646484 \times 10^{-6}$$

Тоді на фотоприймач поступає потік випромінювання

$$\Phi''_e = \tau_{O.C2} \cdot \Phi'_e$$

$$F_{\text{FFe}} := \tau_{O.C2} \cdot F_{\text{Fe}} \quad F_{\text{FFe}} = 1.01573555 \times 10^{-6}$$

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

- 1 Який тип передавальної оптичної системи використовується для формування вузькопрямованого пучка лазерного випромінювання.
- 2 В яких одиницях вимірюється енергетична сила світла.
- 3 В яких одиницях вимірюється світловий потік.
- 4 В яких одиницях вимірюється енергія випромінювання.
- 5 Зобразити рисунок лазерного випромінювання з модою TEM_{01} , TEM_{10} , TEM_{20} , TEM_{30} , TEM_{11} .
- 6 До якого типу відноситься резонатор, якщо має параметри $g_1 = g_2 = 0$. Зобразити діаграму.
- 7 За діаграмою стійкості визначити до якого типу відноситься резонатор з параметрами $R_1 = 0.157 \text{ м}$, $R_2 = 1,5 \text{ м}$, $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$, $q = 1 \cdot 10^6$.

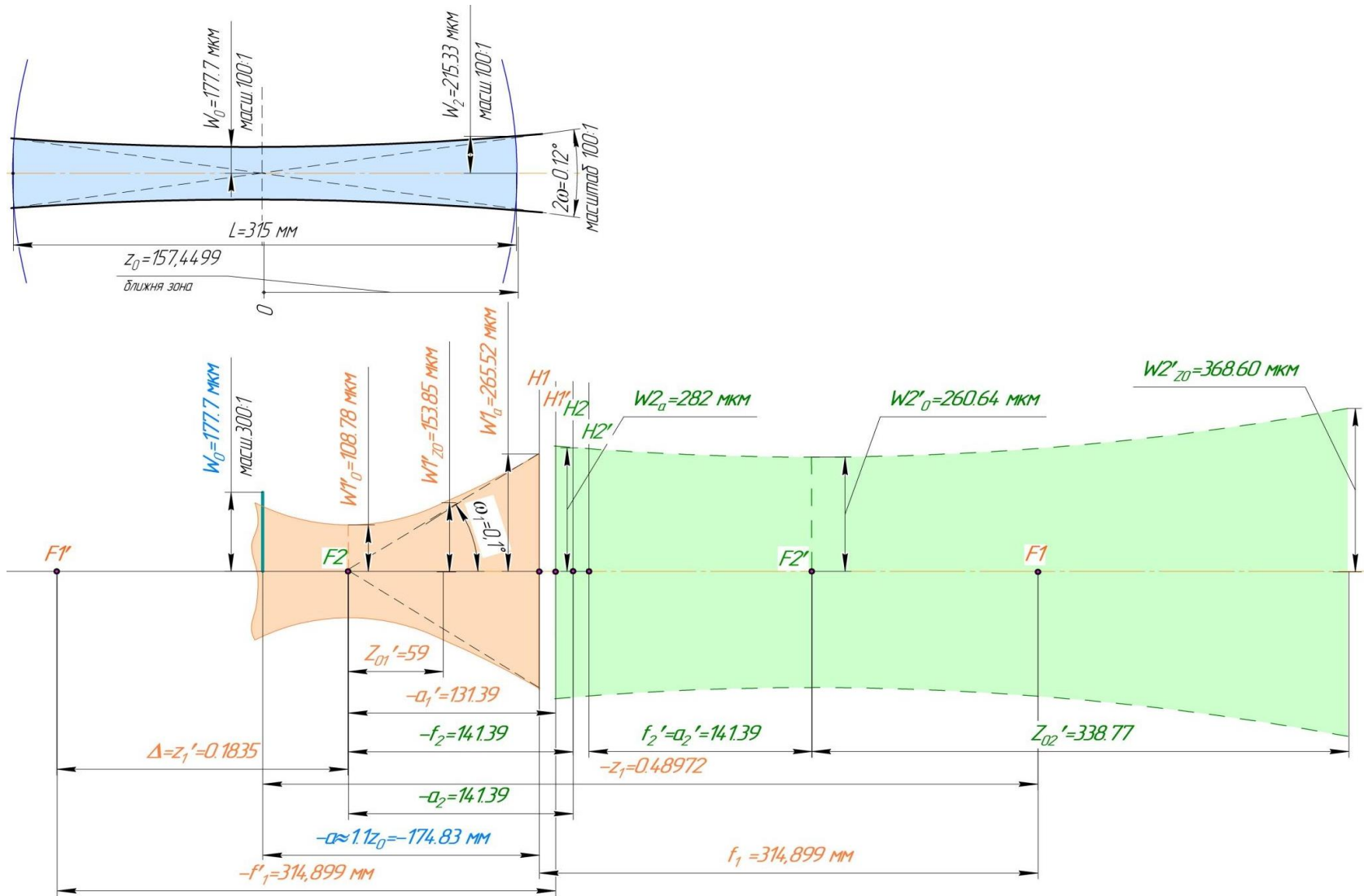


Рисунок 5.6 - Результат розрахунку фотоелектричної системи з лазером

Література

1. Мачехін Ю.П., Гнатенко О.С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч.2.Параметри лазерного випромінювання. Харків:» Факт», 2021. 145 с.
2. Комп'ютерні методи проєктування оптико-механічних систем. [Електронний ресурс]: навч.посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спец.: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. К. Кучеренко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 169 с.
3. Тимчик Г.С. Лазерні технології. Практикум: Навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Автоматизація та укомп'ютерно-інтегровані технології в приладобудуванні» спеціальності 152 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»/ Укл. Г.С.Тимчик , Г.В.Богатирьова, М.С. Мамута. Електронне мережеве видання. – Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2022. – 124 с
4. Однодворець Л. В. Оптикоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині: навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха, І. М. Лукавенко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 127 с.
5. Сокурєнко В. М. Фотоприймальні елементи та пристрої [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спец. 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології і 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / В. М. Сокурєнко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 157 с.
6. Сокурєнко В.М. Перетворення сигналів в оптико-електронних системах [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спец. 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / В. М. Сокурєнко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 114 с.
7. Мохунь І.І., Вікторовська Ю.Ю., Галушко Ю.К. Оптичні технології в інформаційній техніці. – Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2021. – 301 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №6 ФОТОПРИЙМАЛЬНІ ОПТИЧНІ СИСТЕМИ

Мета роботи: навчитися здійснювати розрахунки із узгодження приймача випромінювання з оптичною схемою та електронним трактом.

1. Підготовка до роботи

При підготовці до роботи вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Параметри за якими здійснюється вибір багатоеlementних приймачів випромінювання.
2. Алгоритм узгодження параметрів і характеристик приймачів випромінювання.
3. Специфічні вимоги до електричної схеми попереднього підсилювача.
4. Узгоджувальні каскади фотоприймальних пристроїв.
5. Фотоприймальні пристрої на фоторезисторах.
6. Фотоприймальні пристрої на фотодіодах.

2. Теоретичні відомості

2.1 Попередній вибір приймача випромінювання і його узгодження з оптичною системою і електронним трактом

Основою для вибору важливих параметрів і характеристик приймача випромінювання, а як наслідок і типу приймача, є енергетичний розрахунок оптико-електронного пристрою (ОЕП). Аналіз основного енергетичного рівняння, що описує алгоритм роботи конкретного приладу і представленого у вигляді функції параметрів джерела випромінювання, передавальної оптичної системи, середовища розповсюдження потоку, приймальної оптико-електронної системи, дозволяє вибрати спектральний діапазон роботи приймача випромінювання (ПВ), його виявлену здатність, чутливість, площу чутливого шару, вимоги до постійної часу.

Для пеленгаторів, локаторів, зіркових датчиків необхідно вибрати ті приймачі випромінювання, які забезпечують найвищу виявлену здатність і достатню швидкодію, мають малі розміри і масу, добру стійкість до змінних зовнішніх умов. Для високоточних лабораторних ОЕП доцільно вибрати високостабільні ПВ, які мають високу чутливість і лінійність енергетичної характеристики; для переносних ОЕП – малогабаритні високочутливі ПВ з низькою напругою живлення.

Одночасно із специфікою різних ОЕП необхідно враховувати особливості окремих класів і типів приймачів. Так, якщо ОЕП призначений для роботи в видимій області спектру, можна використовувати фотоелементи, фотоелектронні множники (ФЕУ), а також фоторезистори на основі CdS, CdSe. ФЕУ доцільно використовувати у швидкодійній та імпульсній апаратурі лише при малих потоках випромінювання і при відсутності фонового

випромінювання, оскільки засвічування у ФЕУ сильно погіршує еквівалент шуму темного струму. Окрім того, ФЕУ мають порівняно великі габаритні розміри, вимагають застосування стабілізованого високовольтного джерела живлення і досить чутливі до дії електромагнітних та інших зовнішніх полів, а також вібрації.

В малогабаритній швидкодійній апаратурі іноді доцільно використовувати високочастотні фотодіоди, серед яких найбільше розповсюдження отримали *p-i-n* фотодіоди і особливо лавинні фотодіоди, які мають малу постійну часу $\tau = 10^{-8} \text{ с}$. Окрім того, лавинні фотодіоди володіють внутрішнім підсиленням фотоструму, тобто по суті, вони є напівпровідниковими аналогами ФЕУ, з потенційно вищим відношенням сигнал/шум. Проте на практиці цих переваг не завжди вдається реалізувати внаслідок значної залежності коефіцієнта підсилення лавинних діодів від нестабільності температури і напруги живлення. Для реалізації підсилювальних властивостей лавинних фотодіодів застосовують різноманітні способи їх термостабілізації та стабілізації джерела живлення.

Достатньо широко як приймачі випромінювання в ОЕП використовують передавальні телевізійні трубки – дисектор, суперортікон, ортікон. Поряд із перетворенням потоку випромінювання в електричний сигнал вони одночасно виконують функції аналізатора зображення. Ці трубки мають досить високу виявлену здатність і чутливість, низьку постійну часу, але складні конструктивно. Широко застосовуються в ОЕП також твердотілі аналоги телевізійних передавальних трубок – прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) та прилади із зарядовою інжекцією (ПЗІ). У порівнянні з телевізійними передавальними трубками ПЗЗ та ПЗІ мають менші габаритні розміри і масу і потребують меншої напруги живлення.

Все більше розповсюдження отримують багатоелементні фотодіоди, фоторезисторні та деякі інші лінійки і матриці з повною електричною розв'язкою окремих чутливих елементів, які дозволяють виконати довільну координатну вибірку сигналів з окремих елементів. Поки що вони поступаються ПЗЗ за кількістю елементів і просторовій дозвільній здатності, по діапазону амплітуд приймальних сигналів, по габаритах окремих елементів, проте їх перевага (дозвільна здатність, ширший спектральний діапазон) та успіхи технології їх виготовлення роблять ці приймачі досить перспективним для багатьох ОЕП.

Для роботи в ІЧ діапазоні розроблені гібридні мозаїчні приймачі, в яких чутливий шар складається із окремих фотодіодів або фоторезисторів, з'єднаних з ПЗЗ-ячейками, з допомогою яких виконується зчитування сигналів. Розроблюються багатоколірні приймачі, які працюють в декількох спектральних діапазонах. Параметри деяких сучасних матричних приймачів наведені в таблиці 6.1.

Вибір типу багатоелементного приймача випромінювання (БПВ) визначається такими його параметрами:

- Розмір чутливого шару одного елементу, від якого залежить просторова дозвільна здатність БПВ і всього приладу;

- Загальна кількість елементів, визначає загальну площу чутливого шару приймача, а як наслідок, розміри кутового поля ОЕП;
- Чутливість, залежить як від матеріалу, із якого виготовлений приймач, так і від розмірів чутливого шару елемента;
- Однорідність параметрів окремих елементів і, перш за все, їх чутливості;
- Рівень шумів, визначається не тільки складовим шумом, притаманним одноелементним приймачам, але і рядом специфічних складових («геометричний шум», перехресні зв'язки та інш.)

Всі ці параметри тісно пов'язані між собою, а також з параметрами оптичної системи і електронного тракту. Наприклад, чим менші розміри чутливого шару одного елемента, тим менші деталі зображення можуть сприйматися приймачем. Проте зменшення розмірів елемента, тобто площі його чутливого шару, знижує чутливість елемента, оскільки вихідний сигнал збільшується із збільшенням площі чутливого шару. При заданому кутовому полі, розглядуваному БПВ, і постійному відносному отворі об'єктива ОЕП, зменшення розмірів БПВ призводить до збільшення їх кількості, що не завжди доцільно з точки зору технологічних та техніко-економічних факторів. З іншого боку збільшення кількості елементів БПВ із збереженням їх розмірів вимагає збільшення фокусної відстані об'єктива для збереження кутової дозвільної здатності в просторі предметів.

При постійному діаметрі вхідної зіниці об'єктива це призводить до зменшення відносного отвору і, як наслідок, до погіршення світлосили ОЕП, тобто до зменшення чутливості. Окрім того, при проектуванні ОЕП, призначених для побудови зображення, наприклад в тепловізійних системах, необхідно враховувати ефект накладення (виникнення побічних зображень), що з'являються при просторовій вибірці зображення БПВ з періодом розташування окремих елементів T_e , якщо максимальна просторова частота в спектрі зображення перевищує так звану частоту Найквіста $f = \frac{0.5}{T_e}$.

Узгодження параметрів і характеристик приймача випромінювання і оптичної системи в загальному випадку починається з вибору:

- робочого спектрального діапазону, тобто з оцінки раціональності відповідності спектральних характеристик пропускання оптичної системи і чутливості приймача один до одного,;
- спектрів випромінювання спостережного або виявленого джерела і пропускання середовища на трасі розповсюдження оптичного сигналу від джерела до ОЕП;
- оцінка відповідності або вибір раціональних геометро-оптичних параметрів оптичної системи і приймача. Їх взаємозв'язок витікає із відомих в прикладній оптиці інваріанту Лагранжа-Гельмгольца, дійсного для двох будь-яких перетинів світлової трубки:

$$n \cdot l \cdot \sin(\sigma) = n' \cdot l' \cdot \sin(\sigma')$$

n, n' - показники заломлення середовища в просторі предметів і зображення;

l, l' - поперечний розмір предмета і його зображення;

σ, σ' - передній і задній апертурні кути оптичної системи.

Тоді можна встановити зв'язок між діаметром вхідної зіниці об'єктива ОЕП ($D=1$), і його кутовим полем ($2 \cdot \omega = 2 \cdot \sigma$), розміром чутливої площадки приймача l' та граничним кутом падіння σ' променів на цю площадку.

Типові схеми включення приймачів випромінювання в електричну схему показано на рис.6.1.

Електричну схему попереднього підсилювача необхідно розроблювати з урахуванням специфічних вимог:

- електрична схема попереднього підсилювача або підсилювача повинна бути простою;
- попередній підсилювач повинен нормально функціонувати при значному розкиді параметрів (до 20-30) елементів в діапазоні температур ($-60 \dots +125^\circ C$);
- рівень власних шумів, приведений до входу попереднього підсилювача, повинен бути в 3-10 разів нижчий рівня шумів приймача, а вихідний опір не більше 50-150 Ом;
- динамічний діапазон ФПП по напрузі без врахування АРП (автоматичний регулюючий пристрій) повинен бути не менше 60 дБ для імпульсних сигналів і не менше 40 дБ для гармонійних сигналів, щоб забезпечити необхідну кількість градацій предавального сигналу.

Таблиця 6.1 - Типові значення параметрів сучасних матричних приймачів випромінювання

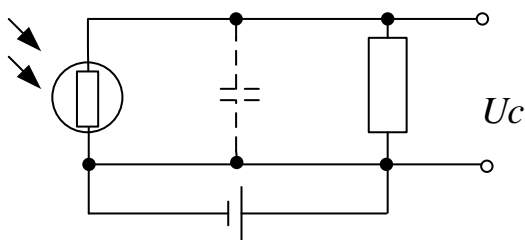
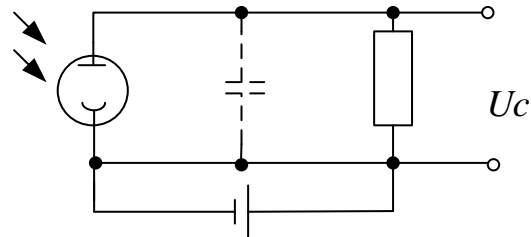
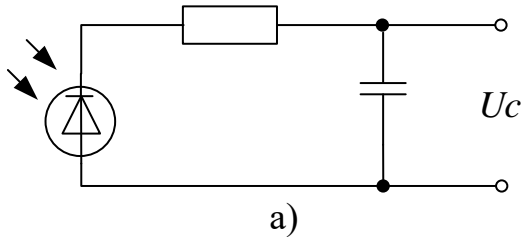
<i>Спектральний діапазон</i>	<i>Матеріал</i>	<i>Тип фотоматриці</i>	<i>Кількість елементів</i>	<i>Розміри елемента, мкм</i>
УФ	Si	ПЗЗ	400x400	10-30
видимий	Si	ПЗЗ	480x640 2000x2000	10-30
середньо хвильовий ІЧ (3-5 мкм)	InSb	гібридна	256x256	40-60
	HgCdTe		512x512	20-60
	PtSi	ПЗЗ	488x640	20-40
	PtSi		488x640	20-40
довго хвильовий (8-12 мкм)	HgCdTe	гібридна	256x256	40-60
	IrSi, GeSi	ПЗЗ	400x400	20-40
	болометри	Монолітна гібридна	245x328 240x336	50
видимий	Si	КМОП	2048x2048 512x512	10-30
3-5 мкм	JnSb	КМОП	65000-327000	40-60

Продовження таблиці 6.1

Спектральний діапазон	Рівень темного (фоновому шуму) Електрон/елемент	Неоднорідність чутливості і окремих елементів, %	Робоча температура, К
УФ	1-5	1	260-300
видимий	1-5	1	260-300
середньо хвильовий ІЧ (3-5 мкм)	80-500	4	55-80
	100-1000	5	60-120
	80-500	2	50-80
	20-100	0,25	55-80
довго хвильовий (8-12 мкм)	300-3000	20	40-80
	20-100	1	30-60
	30000	20	300
видимий	2-5	-	260-300
3-5 мкм	80-500	-	55-80

2.2 Типові схеми включення приймачів випромінювання

Електричний сигнал U_c , що виробляється в ланцюгу включення, як правило, малий і не придатний для безпосереднього використання в виконавчих пристроях, блоках індикації та реєстрації. Його необхідно підсилити та узгодити з наступним електронним трактом. Ці функції виконує ланцюг зв'язку та підсилювача.



*Примітка Конденсатори показані штриховими лініями, представляють собою власну ємність приймача випромінювання та ємність монтажу ланцюга включення

Рисунок 6.1 - а) приймач-генератор ЕРС (термоелемент, фотодіод в фотогальванічному режимі роботи); б) приймач-генератор струму (ФЕУ, фотоелемент); в) приймач-генератор зміни опору (фоторезистор, болометр)

Узгоджувальні каскади фотоприймальних пристроїв

Узгодження необхідно внаслідок того, що внутрішній опір більшості приймачів випромінювання може бути або досить низьким (одиниці і десятки

Ом), або достатньо високим (від сотень кОм до сотень МОм) у порівнянні із вхідним опором підсилювачів, а власна ємність приймачів змінюється від одиниць до декількох сотень пФ, що накладає певні обмеження на вибір параметрів узгоджувальних ланцюгів. Окрім того, для попередження втрат корисної інформації від випромінювача середнє квадратичне значення напруги шумів електронного тракту, що приведено до входу $\tilde{y}_{ш.э.вх}$, повинну бути в декілька разів меншим середнє квадратичного значення напруги шумів приймача випромінювання.

Як узгоджувальні каскади (або ланцюгів зв'язку) в ОЕП використовують катодний, емітерний або істоковий повторювач для високоомних приймачів випромінювання рис.6.2 а, б, в, трансформаторний ланцюг для низькоомних приймачів рис.6.2 г та RC-ланцюг рис.6.2 д, якщо вхідний опір попереднього підсилювача $R_{вх}$ і власний опір приймача приблизно однакові.

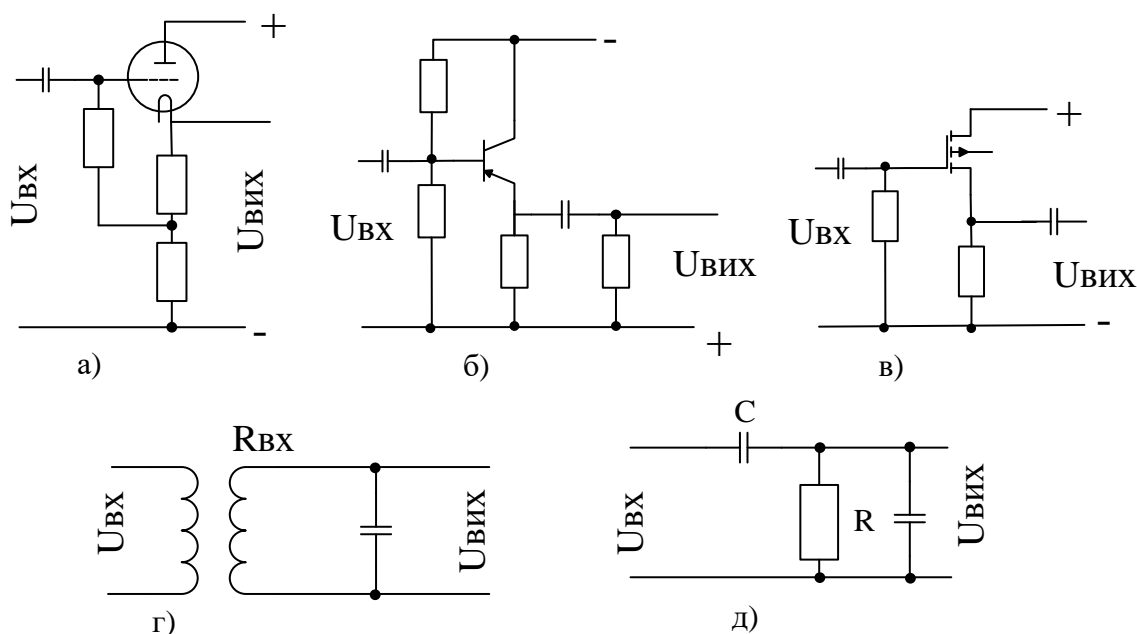


Рисунок 6.2 - а, б, в) - катодний, емітерний або істоковий повторювач для високоомних приймачів випромінювання; г) трансформаторний ланцюг; д) RC-ланцюг

Для узгодження низькоомних приймачів випромінювання використовують також малошумні транзистори, включені за схемою із загальною базою, або декілька транзисторів, паралельно включених за схемою із загальним емітером, а для деяких приймачів - операційні підсилювачі, які можуть мати як великий, так і малий вхідний опір.

Приймач випромінювання з ланцюгом його включення та узгоджувальним каскадом називають **фотоприймальним пристроєм**. Проте у зв'язку з тим, що в різноманітних ОЕП все більш широко застосовують багатоелементні приймачі випромінювання, які одночасно виконують функції перетворення потоку випромінювання в електричний сигнал і аналізу зображення, під **ФПП необхідно розуміти** вузли, що включають власне приймач

випромінювання і елементи, які реалізують певні перетворення сигналу, наприклад, селекцію оптичного сигналу за допомогою багатоколірних фільтрів, попереднє підсилення електричного сигналу, електричне узгодження приймача випромінювання із входом електронного тракту, а також в деяких випадках найпростішу попередню обробку сигналу, наприклад, фільтрацію, запам'ятовування і т.п. Окрім цього, до ФПП можуть бути також включені вузли, що виконують охолодження або термостабілізацію приймача випромінювання, стабілізацію його робочої точки по напрузі живлення, автоматичне регулювання живлення та внутрішню комутацію електричного сигналу (для багатоелементних приймачів випромінювання у вигляді ПЗС)

Енергетичні показники роботи ФПП визначаються вимогами по потужності розсіювання та граничної температури. Необхідно враховувати, що при підвищенні температури знижуються гранично допустимі напруга і потужність, погіршуються також електричні характеристики, можлива поява механічних дефектів, тріщин в кристалах, обрив з'єднувальних провідників та металізації, порушення герметичності.

2.3 Фотоприймальні пристрої на фоторезисторах

Електричну схему ФПП (або підсилювача ОЕП) необхідно розробляти із врахуванням великої кількості специфічних вимог, основними із яких для більшості ОЕП є:

- електрична схема попереднього підсилювача або підсилювача повинна бути надпростою;
- попередній підсилювач або підсилювач повинен нормально функціонувати при значному розкиді (до 20-30 %) параметрів елементів в діапазоні температур $-60 \dots +125^{\circ}C$;
- рівень власних шумів, приведених до входу попереднього підсилювача, повинен бути в 3 – 10 разів меншим рівня шумів приймача, а вихідний опір повинен бути не більше 50-150 Ом;
- динамічний діапазон ФПП по напрузі без врахування дії АРП (автоматичний регулюючий пристрій) повинен бути не менше 60 дБ для імпульсних сигналів і не менше 40 дБ для гармонійних сигналів, щоб забезпечити необхідне число градацій передаючого сигналу.

Окрім того, операційні підсилювачі, що використовуються в ФПП, повинні мати мінімальний дрейф нуля, а підсилювачі зчитування, повинні мати вузьку область перекидання та мінімальну зону гістерезису.

Узагальнена структурна схема ФПП на основі фоторезистора із підсилювачем показана на рис.6.3.

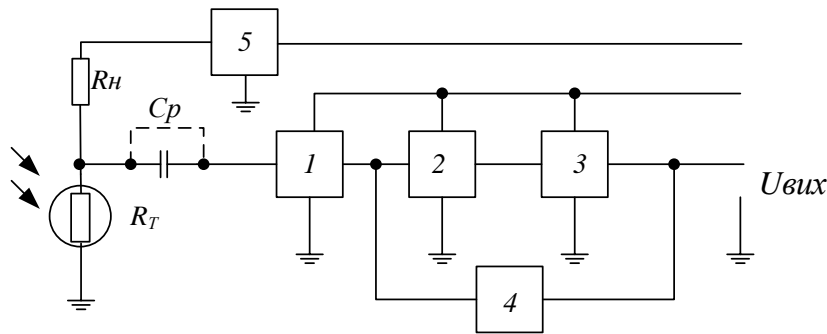


Рисунок 6.3 - Узагальнена структурна схема ФПП на основі фоторезистора

1 - узгоджувальний каскад; 2 - підсилювач; 3 - вихідний каскад; 4 - блок автоматичного регулювання підсилення; 5 - фільтр

Опір навантаження R_H вибирають рівним темновому опору R_T фоторезистора, що доцільно з точки зору забезпечення максимальної чутливості ФПП. В деяких випадках опір R_H підбирають експериментально, виходячи із умови максимізації співвідношення сигнал/шум.

Розподільчий конденсатор C_p використовується в ФПП, призначених для прийняття гармонійних або імпульсних сигналів. Як роздільний елемент може слугувати і мікромініатюрний трансформатор.

Узгоджувальний каскад 1 (попередній підсилювач) забезпечує оптимальне узгодження фоторезистора з підсилювачем і збільшення амплітуди фотосигналу до значення, достатнього для подальшої обробки.

При виборі принципової схеми узгоджувального каскаду необхідно, щоб його коефіцієнт шуму F був мінімальним. Забезпечити цю вимогу нескладно, оскільки при сучасній технології виготовлення ПВ і електронних компонентів останні мають мінімальні шуми і, окрім того, в електронному тракті легше виконати протишумову корекцію.

За значення темного опору R_T і середнє квадратичної напруги шумів фоторезисторів, приведених до одиничної смуги частот Δf , узгоджувальні каскади ФПП розділяють на три групи.



З метою зменшення рівня шумів ФПП можна використовувати охолодження як самого фоторезистора і навантаження, так і інших елементів ФПП до температури $T=6 - 100 \text{ K}$. В цьому випадку ФПП будують на основі польових транзисторів.

2.4 Фотоприймальні пристрої на фотодіодах

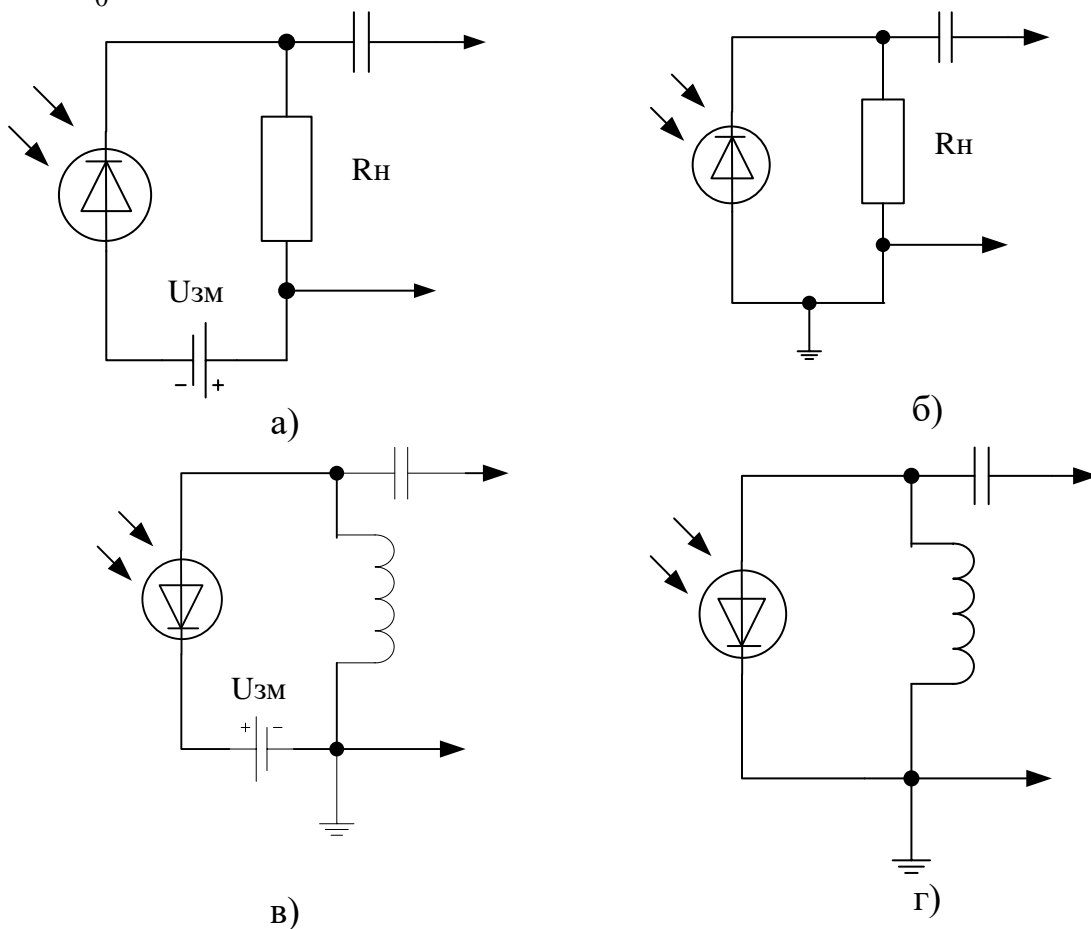
Схеми включення фотодіодів, що працюють в фотодіодному та фотогальванічному режимах показано на рис.6.4. Для підвищення вольтової чутливості фотодіодів необхідно збільшити опір навантаження R_n . При фотодіодному режимі роботи максимальне значення навантаження R_{nmax} пов'язано з максимальним потоком випромінювання Φ_{max} , який зможе зареєструвати фотодіод, наступним співвідношенням:

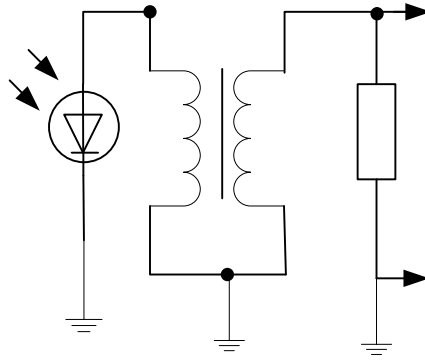
$$R_{nmax} = \frac{U_{зм}}{S_I \cdot \Phi_{max} + I_0} \quad (6.1)$$

$U_{зм}$ – робоча напруга живлення фотодіода (напруга зміщення);

S_I – струмова чутливість;

I_0 – темновий струм через р-п - перехід.





д)

Рисунок 6.4 - Схеми включення фотодіодів: а), б) на активне навантаження; в), г), д) на реактивне навантаження в фотогальванічному (б, г, д) та фотодіодному (а, в) режимах

При цьому точка перетину прямої навантаження з вольт-амперною характеристикою, що відповідає максимальному потоку випромінювання, повинна знаходитися в області фотодіодного режиму. Максимальна вольтова чутливість в цьому випадку:

$$S_{U_{max}} = \frac{U_{зм}}{\Phi_{max} + \frac{I_0}{S_I}} \quad (6.2)$$

Якщо фотострум $I_F \gg I_0$, максимальна вольтова чутливість не залежить від параметрів фотодіоду, тобто $S_{U_{max}} = \frac{U_{зм}}{\Phi_{max}}$ і $R_n \approx \frac{U_{зм}}{I_{F_{max}}}$.

При $I_F \ll I_0$ ця чутливість тим більша, чим менше значення I_0 , тобто $S_{U_{max}} = \frac{U_{зм} \cdot S_I}{I_0}$.

При роботі фотодіода з модульованим сигналом від випромінювача на фоні немодульованої засвітки необхідно, щоб його вольтова чутливість по змінному струму була максимальною, а по постійному (від фону) – мінімальною. Для цього доцільно використовувати трансформаторну або дросельну схему включення фотодіоду, яка дозволяє отримувати великий опір \tilde{R}_n за змінним струмом (індуктивний опір) та малий активний опір R_n за постійним струмом. При роботі із різними навантаженнями за постійним та змінним струмом величина R_n визначає режим роботи фотодіоду, а \tilde{R}_n - визначає вольтову чутливість. Опір навантаження по постійному струму бажано вибирати набагато меншим, ніж значення $R_{n_{max}}$ за формулою (6.1).

При фотогальванічному режимі роботи фотодіодів максимальний опір навантаження по постійному струму, що забезпечує лінійність енергетичної характеристики, визначають за формулою:

$$R_{n \max} = \frac{0.2 \cdot k \cdot T}{e \cdot I_{F \max}} \quad (6.3)$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹ – постійна Больцмана;
 T – абсолютна температура фотодіода, К;
 e – заряд електрона.

Максимальна вольтова чутливість при цьому:

$$S_{U \max} = \frac{S_I \cdot k \cdot T / e \cdot I_0}{1 + k \cdot T / e \cdot I_0 \cdot Z_n} \quad (6.4)$$

де Z_n - повний опір навантаження.

Проте необхідно врахувати, що оскільки опір р-п переходу залежить від I_F , оптимальний опір навантаження в умовах сильної зміни фотоструму підібрати неможливо. Тому для випадку, коли $50 \leq \frac{I_F}{I_0} \leq 10^{10}$, з похибкою не більше 3-4 % опір навантаження можна визначити за формулою:

$$R_n = \frac{0.88 \cdot A \cdot k \cdot T}{e \cdot I_0} \cdot \frac{\ln\left(\frac{I_F}{I_0}\right)}{\frac{I_F}{I_0}} \quad (6.5)$$

де A - коефіцієнт, що залежить від матеріалу фотодіоду, зазвичай 1 - 4 (для германієвих $A = 1$).

Окрім того необхідно враховувати, що при збільшенні R_n одночасно із збільшенням відношення сигнал/шум збільшується і постійна часу ФПП $\tau_{\text{ФПП}}$, що визначається рівністю:

$$\tau_{\text{ФПП}} = \sqrt{\tau_{n.e}^2 + \tau_{\text{П}}^2 + \tau_{\text{ex}}^2} \quad (6.6)$$

де $\tau_{n.e}$ - постійна часу приймача випромінювання;

$\tau_{\text{П}}$ - постійна часу підсилювача;

τ_{ex} - постійна часу його вхідного ланцюга.

Тому для покращення швидкодії ОЕП використовують схеми ФПП з операційним підсилювачем або ланцюгом корекції постійної часу.

Для прийому синусоїдально модульованого та імпульсного сигналу можна використовувати схеми рис.6.5.

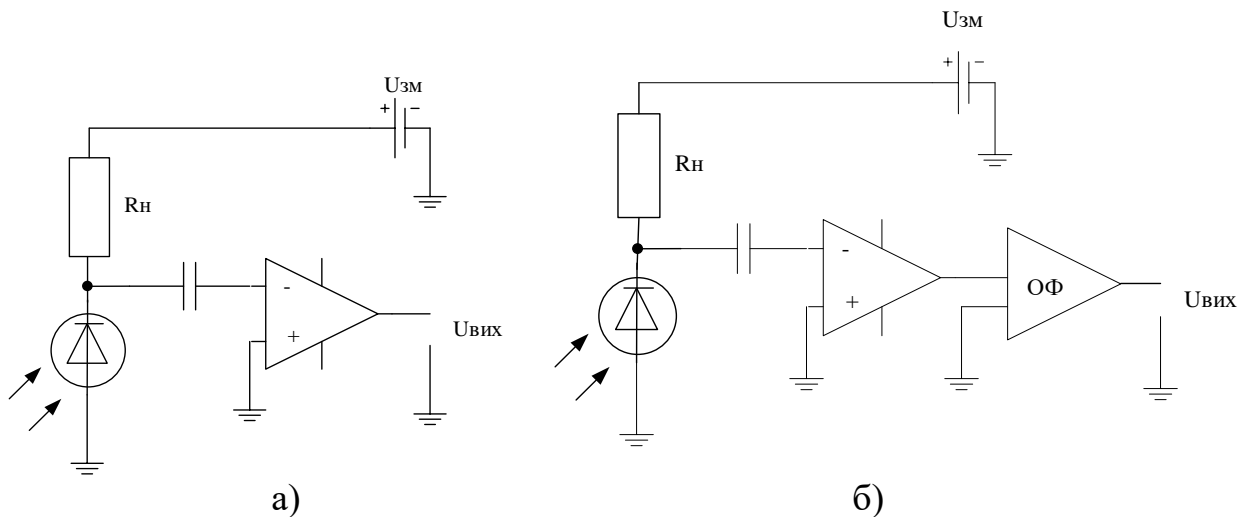


Рисунок 6.5 - Функціональні схеми ФПП з фотодіодами для прийому:
 а) синусоїдального модульованого сигналу; б) імпульсного сигналу із оптимальним фільтром (ОФ)

Застосовують також схеми з операційними підсилювачами, охопленими від'ємним зворотнім зв'язком по напрузі рис.6.6. Операційні підсилювачі мають достатньо великий коефіцієнт підсилення (до 100 дБ), широкую смугу пропускання (до 100 МГц), високий вхідний опір (до 1000 МОм) та малий вихідний опір.

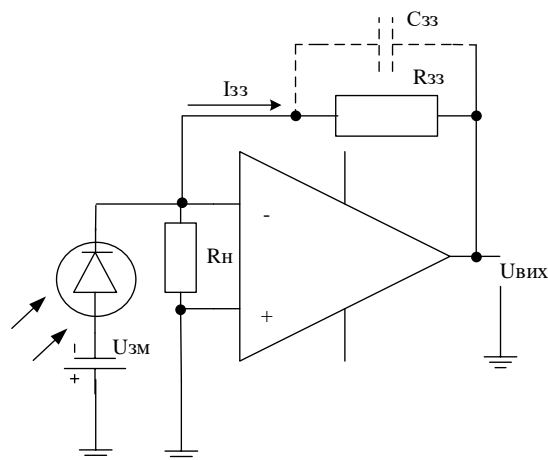


Рисунок 6.6 - Функціональна схема ФПП з фотодіодом, включеним на вході ОП

Частотна характеристика ОП із зворотним зв'язком визначається опором $R_{з.з}$ і досить малою ємністю $C_{з.з}$ ланцюга зворотного зв'язку, і верхня частота частотної характеристики визначається за формулою:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{з.з} \cdot C_{з.з}} \quad (6.7)$$

При великому коефіцієнті підсилення напруга сигналу на виході підсилювача:

$$U_{\text{вих}} = S_I \cdot R_{3.3} \cdot \Phi \quad (6.8)$$

Фотоприймальний пристрій на основі ОП має великий динамічний діапазон у порівнянні з ФПП на основі підсилювача з великим вхідним опором, у якого використовується ланцюг корекції для зменшення

$$\tau_{\text{ОП}} = R_{\text{вх}} \cdot C_{\text{вх}} \quad (6.9)$$

Як коректувальний ланцюг може бути використано, наприклад, диференційний ланцюг, який має великий коефіцієнт передачі на високих частотах і малий коефіцієнт передачі на низьких частотах

Вхідний опір ФПП з операційним підсилювачем при наявності зворотного зв'язку:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{3.3}}{K_0} \quad (6.10)$$

де $R_{3.3}$ - опір в ланцюгу зворотного зв'язку;

K_0 - коефіцієнт підсилення операційного підсилювача при розімкненому зворотному зв'язку.

Вхідний опір операційного підсилювача при замкнутому зворотному зв'язку є навантаженням фотодіода. При $K_0 = 10^4 \dots 10^5$ цей опір зазвичай не перевищує значення порядку десятків Ом. Використання низькоомного навантаження дозволяє збільшити швидкодію ФПП, оскільки в цьому випадку виключається вплив власної ємності фотодіода. Зменшення навантаження фотодіода також дозволяє зменшити нелінійність енергетичної характеристики всього ФПП.

Перевагами такої схеми ФПП є відсутність необхідності стабілізації коефіцієнта підсилення операційного підсилювача.

Вольтова чутливість ФПП:

- при прийомі постійного потоку випромінювання: $S_{\bar{U}} = S_I \cdot R_{3.3}$;
- при прийомі синусоїдального модульованого потоку випромінювання:

$$S_U = \frac{S_I \cdot R_{3.3}}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f_m)^2 \cdot R_{3.3}^2 \cdot C_{3.3}^2}} \quad (6.11)$$

де f_m - частота модуляції потоку випромінювання;

$C_{3.3}$ - ємність в ланцюгу зворотного зв'язку.

Середнє квадратична напруга шуму на виході ФПП визначається за формулою:

$$U_{ш.вих.ФПП} = K_{ФПП} \cdot \sqrt{\bar{U}_{ш.ОП}^2 + (\bar{i}_{ш.ОП}^2 + \bar{i}_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з}^2) \cdot R_{з.з}^2} \quad (6.12)$$

де $K_{ФПП}$ - коефіцієнт підсилення по напрузі ФПП;

$\bar{U}_{ш.ОП}$ - середнє – квадратична напруга шуму підсилювача;

$\bar{i}_{ш.ОП}, \bar{i}_{ш.ФД}, \bar{i}_{ш.з.з}$ - середнє квадратичне значення шумових струмів відповідно підсилювача, фотодіода, опору зворотного зв'язку.

Для сучасних ОП спектральні щільності середніх квадратичних значень шумового струму і напруги складають відповідно:

$$\bar{i}_{ш.ОП.f} = (1\dots2) \cdot 10^{-14} \text{ А} \cdot \Gamma\mu^{0,5}, \bar{U}_{ш.ОП.f} = (1\dots7) \cdot 10^{-8} \text{ В} \cdot \Gamma\mu^{0,5}. \quad (6.13)$$

Середнє квадратичне значення шумового струму фотодіода:

- в фотодіодному режимі:

$$\bar{i}_{ш.ФД} = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_T \cdot \Delta f}, \quad (6.14)$$

де I_T - темновий струм фотодіода; Δf - ефективні смуга пропускання.

- при фотогальванічному режимі роботи:

$$\bar{i}_{ш.ФД} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_o}}, \quad (6.15)$$

де R_o - динамічний опір незміщеного р-п – переходу.

Середнє квадратичне значення шумового струму опору в ланцюгу зворотного зв'язку:

$$\bar{i}_{ш.з.з} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_{з.з}}}, \quad (6.16)$$

На спектральну щільність шуму фотодіода суттєвий вплив виявляє ємність р-п переходу. Вибір операційного підсилювача з мінімально можливими значенням вхідної ємності дозволяє зменшити залежність шуму від ємності фотодіода.

При використанні малощумних операційних підсилювачів домінуючими стають шуми фотодіода і резистора зворотного зв'язку. Тоді середнє квадратичне значення вихідного шуму:

$$\bar{U}_{ш.вих.ФПП} = K_{ФПП} \cdot \sqrt{(\bar{i}_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з}^2) \cdot R_{з.з}^2}. \quad (6.17)$$

Відношення сигнал/шум в цьому випадку:

$$\left(\frac{U_c}{\bar{U}_{ш}} \right)_{вих} = \frac{S_I \cdot \Phi}{\sqrt{(\bar{i}_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з}^2)}} \quad (6.18)$$

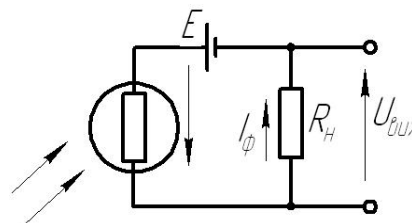
У випадку роботи фотодіода в фотогальванічному режимі опір зворотного зв'язку вибирають більшим, ніж еквівалентний опір незміщеного р-п – переходу, тобто $R_{з.з.} > R_{\delta}$. Тому значення $i_{ш.ФД}$ набагато більше середнє квадратичного значення теплового шуму в навантаженні $\bar{i}_{ш.з.з.}$, і вираз для співвідношення сигнал/шум набуває вигляд:

$$\left(\frac{U_c}{U_{ш}}\right)_{вих} = \frac{S_I \cdot \Phi}{\sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_{\delta}}}} \quad (6.19)$$

3. Виконання роботи

Завдання 1

Визначити первинний фотострум провідності для елемента ****, що підключений за схемою.



Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
тип фоторезистору	ФСК-2	ФСК-3	СФ2-1	СФ2-2	ФПФ7-7	ФСД-1	СФ3-1	СФ3-2
U_p, B	50 В	вибрати із будь-яких довідників						
$R_T, МОм$	3,3							
$I_T, мкА$	40							
$\frac{R_T}{R_c}$	10							
Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
тип фоторезистору	СФ3-3	ФСА-1	ФР1-3	ФР1-4	СФ4-1А	СФ4-1Б	СФ4-1В	СФ4-1Д
U_p, B	вибрати із будь-яких довідників							
$R_T, МОм$								
$I_T, мкА$								
$\frac{R_T}{R_c}$								

Рішення

1. Якщо фоторезистор знаходиться в темноті, то через нього протікає темновий струм:

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_n} \quad (6.20)$$

де E - Е.Р.С. джерела живлення;

R_T - величина електричного опору фоторезистора в темному середовищі, яка називається темновим струмом;

R_n - опір навантаження.

Із даної формули визначаємо необхідний опір навантаження:

$$R_n = \frac{I_T \cdot R_T - E}{I_T} = 2,06 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

2. При освітленні фоторезистора енергія фотонів витрачається на перехід електронів в зону провідності. Кількість вільних електронно-діркових пар збільшується, опір фоторезистора зменшується і через нього протікає світловий струм:

$$I_c = \frac{E}{R_c + R_n} \quad (6.21)$$

При цьому світловий опір визначаємо із співвідношення $\frac{R_T}{R_c} = 10 \Rightarrow R_c = 3,3 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, тоді $I_c = \frac{E}{R_c + R_n} = 2,101 \cdot 10^{-5} \text{ А}$.

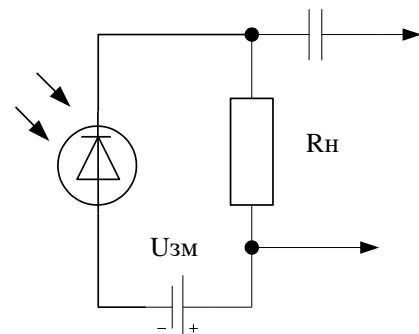
Різниця між світловим і темновим струмом дає значення струму I_ϕ , який отримав назву первинного фотоструму провідності:

$$I_\phi = I_c - I_T = 1,899 \cdot 10^{-5} \text{ А} \quad (6.22)$$

Коли променевий потік малий, первинний фотострум провідності практично безінерційний і змінюється прямо пропорційно величині променевого потоку, який падає на фоторезистор. Зі збільшенням величини променевого потоку збільшується кількість електронів провідності. Рухаючись всередині речовини, електрони стикаються з атомами, іонізують їх і створюють додатковий потік електричних зарядів, які отримали назву вторинного фотоструму провідності. Збільшення кількості іонізованих атомів загальмовує рух електронів провідності. В результаті цього зміна фотоструму затримується в часу відносно зміни світлового потоку, що визначає деяку інерційність фоторезистора.

Завдання 2

Визначити максимальний опір навантаження та вольтову чутливість для приймача ФДК-24К, що включений за схемою при $\Phi_{\max} = 12 \text{ мВт}$



Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
тип фотодіоду	ФДК-24К	ФДК-1	ФД-3К	ФД-6К	ФД-7К	ФД-20КП	ФД-20-33К	ФД-23К
U_p, B	27	технічні характеристики вибираються із довідника						
$I_T, мкА$	2,5							
$S_I, \frac{мА}{лм}$	6							
$\Phi_{max}, мВт$	12	13	14	15	16	17	18	19

Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
тип фотодіоду	ФД-27К	ФД246	ФД-256	ФД-1	ФД-3	ФД-4Г	ФД-5Г	ФД-7Г
U_p, B	технічні характеристики вибираються із довідника							
$I_T, мкА$								
$S_I, \frac{мА}{лм}$								
$\Phi_{max}, мВт$	20	21	22	23	24	25	26	27

Рішення

1. Максимальний опір навантаження визначаємо за формулою:

$$R_{nmax} = \frac{U_{зм}}{S_I \cdot \Phi_{max} + I_0},$$

де $U_{зм}$ – робоча напруга живлення фотодіода (напруга зміщення);

S_I – струмова чутливість;

I_0 – темновий струм через р – n – перехід.

Проте за вихідними даним струмова інтегральна чутливість $S_I = 6 \frac{мА}{лм}$ дається в

фотометричних (світлових) величинах, тому необхідно потік випромінювання також представити в цій системі одиниць. Це можна виконати застосовуючи

коефіцієнт відносної видимості $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де $V_{max} = 680 \frac{лм}{Вт}$. Отримаємо потік в

світлотехнічній (фотометричній) системі одиниць:

$$V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e} \Rightarrow F = V_\lambda \cdot \Phi_e = 8,16 \text{ лм}$$

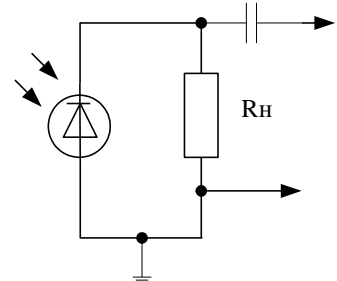
$$\text{Тоді } R_{nmax} = \frac{U_{зм}}{S_I \cdot \Phi_{max} + I_0} = \frac{27}{6 \cdot 10^{-3} \cdot 8,16 + 2,5 \cdot 10^{-6}} = 551,4 \text{ Ом}$$

2. Максимальна вольтова чутливість в цьому випадку:

$$S_{U_{max}} = \frac{U_{зм}}{\Phi_{max} + \frac{I_0}{S_I}} = 3,309 \text{ В/лм}.$$

Завдання 3

Визначити максимальний опір навантаження та вольтову чутливість для приймача ФД-1 при $\Phi_{max} = 20$ мВт, що включений за схемою.



Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
тип фотодіоду	ФД-1	ФДК-1	ФД-3К	ФД-6К	ФД-7К	ФД-20КП	ФД-20-33К	ФД-23К
$U_p, \text{В}$	20	технічні характеристики вибираються із довідника						
$I_T, \text{мкА}$	30							
$S_I, \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$	6							
$\Phi_{max}, \text{мВт}$	20	21	22	23	24	25	26	27

Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
тип фотодіоду	ФДК-1	ФД-3К	ФД-6К	ФД-7К	ФД-20КП	ФД-20-33К	ФД-23К	ФДК-1
$U_p, \text{В}$	технічні характеристики вибираються із довідника							
$I_T, \text{мкА}$								
$S_I, \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$								
$\Phi_{max}, \text{мВт}$	28	29	30	31	32	33	34	35

Рішення

1. При фотогальванічному режимі роботи фотодіодів максимальний опір навантаження по постійному струму, що забезпечує лінійність енергетичної характеристики, визначають за формулою:

$$R_{нmax} = \frac{0.2 \cdot k \cdot T}{e \cdot I_{Fmax}}$$

де $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – постійна Больцмана;
 T – абсолютна температура фотодіода, К;
 e – заряд електрона.

Щоб скористатися цією формулою необхідно визначити максимальний фотострум: $I_{Fmax} = S_I \cdot F$.

Проте за вихідними даним струмова інтегральна чутливість $S_I = 6 \frac{\mu A}{лм}$ дається в

фотометричних (світлових) величинах, тому необхідно потік випромінювання також представити в цій системі одиниць. Це можна виконати застосовуючи

коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де $V_{max} = 680 \frac{лм}{Вт}$. Отримаємо потік в

світлотехнічній (фотометричній) системі одиниць: $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e} \Rightarrow F = V_\lambda \cdot \Phi_e = 13,6 лм$.

Тоді $R_{nmax} = \frac{0,2 \cdot k \cdot T}{e \cdot I_{Fmax}} = 0,062 Ом$.

Оскільки відношення $\frac{I_F}{I_0} = 2,72 \cdot 10^3$, то з похибкою не більше 3-4 % опір

навантаження можна визначити за формулою:

$$R_n = \frac{0,88 \cdot A \cdot k \cdot T}{e \cdot I_0} \cdot \frac{\ln\left(\frac{I_F}{I_0}\right)}{\frac{I_F}{I_0}} = 2,153 Ом$$

2. Максимальна вольтова чутливість при цьому:

$$S_{Umax} = \frac{S_I \cdot k \cdot T / e \cdot I_0}{1 + k \cdot T / e \cdot I_0 \cdot Z_n} = 0,013 В/лм$$

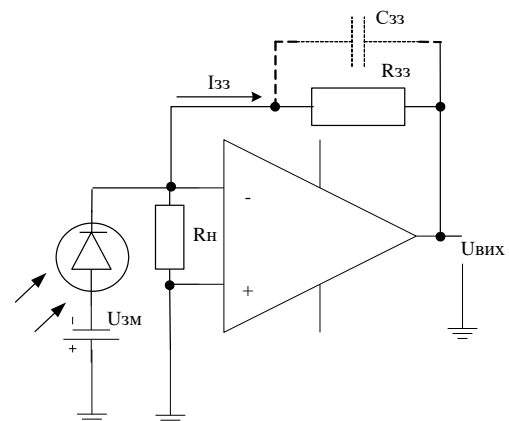
де Z_n - повний опір навантаження.

Проте необхідно врахувати, що оскільки опір р-п переходу залежить від I_F оптимальний опір навантаження в умовах сильної зміни фотоструму підібрати неможливо.

Завдання 4

Визначити напругу на виході підсилювача, вольтову чутливість при прийомі синусоїдально - модульованого потоку випромінювання з частотою модуляції

f_m , $C_{зз}$ та Φ_{max} .



Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
тип фотодіоду	ФД-8к	Тип фотодіоду взяти із завдання 3						
підсилювач	K140УД1А $K = 0,5 \cdot 10^3$, $R_{ex} = 4 \text{ кОм}$	K140 УД2А	K140 УД2Б	K140 УД5А	K140 УД5Б	K140 УД6	K140 УД7	K140 УД8А
U_p, B	20	технічні характеристики вибираються із довідника						
$I_T, \text{мкА}$	30							
$S_I, \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$	8							
$\Phi_{\max}, \text{мВт}$	20	Із завдання 3						
$C_{зз}, \text{нФ}$	1	1,5	2	5	8	0,5	1,75	2
$f_m, \text{Гц}$	10	12	15	17	20	22	10	12

Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
тип фотодіоду	Тип фотодіоду взяти із завдання 3							
підсилювач	K140 УД8Б	K140 УД8В	K140 УД9	K140 УД10	K140 УД11	K140 УД12	K140 УД13	K140 УД14А
U_p, B	технічні характеристики вибираються із довідника							
$I_T, \text{мкА}$								
$S_I, \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$								
$\Phi_{\max}, \text{мВт}$	Із завдання 3							
$C_{зз}, \text{нФ}$	1,5	2	5	8	0,5	1,75	2	0,5
$f_m, \text{Гц}$	12	15	17	20	22	10	12	10

Рішення

1. При великому коефіцієнті підсилення напруга сигналу на виході підсилювача:

$$U_{\text{вих}} = S_I \cdot R_{3.3} \cdot \Phi$$

Для цього необхідно визначити опір зворотного зв'язку. Вхідний опір ФПП з операційним підсилювачем при наявності зворотного зв'язку:

$$R_{\text{ex}} = \frac{R_{3.3}}{K_0} \Rightarrow R_{3.3} = R_{\text{ex}} \cdot K_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

де $R_{3.3}$ - опір в ланцюгу зворотного зв'язку;

K_0 - коефіцієнт підсилення операційного підсилювача при розімкненому зворотному зв'язку

Проте за вихідними даним струмова інтегральна чутливість $S_I = 8 \frac{мА}{лм}$ дається в фотометричних (світлових) величинах, тому необхідно потік випромінювання також представити в цій системі одиниць. Це можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де $V_{max} = 680 \frac{лм}{Вт}$. Отримаємо потік в світлотехнічній (фотометричній) системі одиниць:

$$V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e} \Rightarrow F = V_\lambda \cdot \Phi_e = 13,6 \text{ лм}.$$

$$\text{Тоді } U_{вих} = S_I \cdot R_{3.3} \cdot \Phi = 0,218 \text{ В}.$$

2. При прийомі синусоїдального модульованого потоку випромінювання вольтова чутливість визначається за формулою:

$$S_U = \frac{S_I \cdot R_{3.3}}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f_m)^2 \cdot R_{3.3}^2 \cdot C_{3.3}^2}} = 0,016 \text{ В/лм},$$

де f_m - частота модуляції потоку випромінювання;

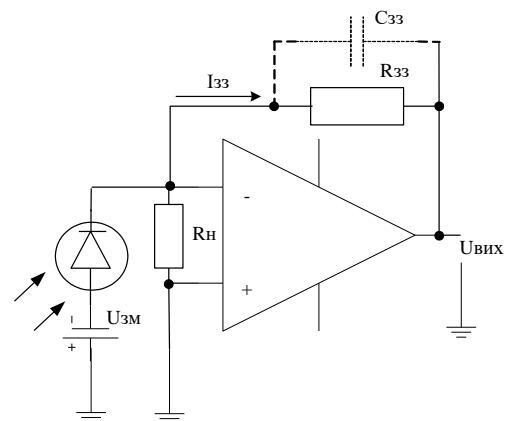
$C_{3.3}$ - ємність в ланцюгу зворотного зв'язку.

3. Частотна характеристика ОП із зворотним зв'язком визначається опором $R_{3.3}$ і досить малою ємністю $C_{3.3}$ ланцюга зворотного зв'язку, і верхня частота частотної характеристики визначається за формулою:

$$f_6 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{3.3} \cdot C_{3.3}} = 79,577 \text{ Гц}.$$

Завдання 5

Визначити співвідношення сигнал/шум на виході підсилювача при $\Phi_{max} = 37 \text{ мВт}$ для смуги пропускання $\Delta f = 100 \text{ МГц}$.



Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
тип фотодіоду	ФД-8к	Тип фотодіоду взяти із завдання 3						
підсилювач	К140УД1А $K = 0,5 \cdot 10^3$, $R_{\text{вх}} = 4 \text{ кОм}$	Тип підсилювача взяти із завдання 4						
$U_p, \text{В}$	10	технічні характеристики вибираються із довідника						
$I_T, \text{мкА}$	0,005							
$S_I, \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$	8							
$\Phi_{\text{max}}, \text{мВт}$	37	40	45	22	25	27	30	35
$\Delta f, \text{МГц}$	100							

Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
тип фотодіоду	Тип фотодіоду взяти із завдання 3							
підсилювач	Тип підсилювача взяти із завдання 4							
$U_p, \text{В}$	технічні характеристики вибираються із довідника							
$I_T, \text{мкА}$								
$S_I, \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$								
$\Phi_{\text{max}}, \text{мВт}$	15	20	23	27	35	40	45	50
$\Delta f, \text{МГц}$	100							

Рішення

1. При використанні малошумливих операційних підсилювачів домінуючими стають шуми фотодіода і резистора зворотного зв'язку. Відношення сигнал/шум в цьому випадку:

$$\left(\frac{U_c}{\bar{U}_{ш}} \right)_{\text{вих}} = \frac{S_I \cdot \Phi}{\sqrt{\left(i_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з}^2 \right)}}$$

2. Середнє квадратичне значення шумового струму опору в ланцюгу зворотного зв'язку:

$$\bar{i}_{ш.з.з} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_{3.3}}} = 8.99 \cdot 10^{-10} \text{ А}$$

Для цього необхідно визначити опір зворотного зв'язку. Вхідний опір ФПП з операційним підсилювачем при наявності зворотного зв'язку:

$$R_{\text{ex}} = \frac{R_{3.3}}{K_0} \Rightarrow R_{3.3} = R_{\text{ex}} \cdot K_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

де $R_{3.3}$ - опір в ланцюгу зворотного зв'язку;

K_0 - коефіцієнт підсилення операційного підсилювача при розімкненому зворотному зв'язку

3. Середнє квадратичне значення шумового струму фотодіода:

- в фотодіодному режимі:

$$\bar{i}_{\text{ш.ФД}} = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_T \cdot \Delta f} = 4,002 \cdot 10^{-10} \text{ А},$$

де I_T - темновий струм фотодіода; Δf - ефективні смуга пропускання.

Підставляємо отримані значення в формулу:

$$\left(\frac{U_c}{\bar{U}_{\text{ш}}} \right)_{\text{вих}} = \frac{S_I \cdot \Phi}{\sqrt{\bar{i}_{\text{ш.ФД}}^2 + \bar{i}_{\text{ш.з.з}}^2}} = 204,4$$

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1 Приймачі оптичного випромінювання. Основні принципи побудови та класифікація.

2 Фоторезистори, принцип дії, електричні та спектральні характеристики.

3 Фотодіоди, принцип дії, конструкції, швидкодія, шуми та інші характеристики.

4 Фотодіоди з р-і-n структурою, діоди Шоттки, лавинні фотодіоди та фотодіоди з гетероструктурою. Співставлення параметрів фотодіодів стосовно застосування їх в спеціальних системах.

5 Фототранзистори, принцип дії, устрій, складені фототранзистори, характеристики.

6 Приймачі оптичного випромінювання із внутрішнім інтегруванням сигналу.

7 Гібридні структури на основі фотонних приймачів та монолітні структури.

8 Якою формулою описується радіаційний шум приймача випромінювання.

9 Якою формулою описується струмовий шум приймача випромінювання.

10 Якою формулою описується тепловий шум приймача випромінювання.

11 Якою формулою описується дисперсія напруги радіаційного шуму на виході приймача.

Література

1. Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів: навч. посібник / А. С. Литвиненко, Г. О. Петченко, О. М. Ляшенко, О. М. Діденко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 139 с.
2. Optoelectronics: radiation sources and detectors [Electronic resource] : The study aid for bachelor's applicants on the educational program “Micro and nanoelectronics” of the specialty 176 Micro- and nanosystem technique / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute ; compilers: G. Sviechnikov, Yu. Didenko, D. Tatarchuk. – Electronic text data (1 file). – Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025. – 271 p.
3. Сокурєнко В. М. Фотоприймальні елементи та пристрої [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп’ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спец. 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології і 174 Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка / В. М. Сокурєнко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 157 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №7 РОЗРАХУНОК ЗНАЧЕНЬ ПОТОКІВ І ОПРОМІНЕНОСТІ НА ВХОДІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ПРИЛАДУ

Мета роботи: навчитися визначати опроміненість та потік на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при різних типах опромінювачів.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Енергетичні характеристики випромінювачів.
2. Енергетичне рівняння оптико-електронного пристрою.
3. Активний режим роботи ОЕП.

2. Теоретичні відомості

Основною енергетичною характеристикою точкового випромінювача є сила випромінювання I_e . Для малих тілесних кутів потік $\Delta\Phi_e$ або опроміненість E_e на вхідній зіниці площею $A_{\text{вх}}$ розраховують:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot I_e \cdot \Delta\Omega = \frac{\tau_c \cdot A_{\text{вх}} \cdot I_e}{l^2}; E_e = \frac{\Delta\Phi_e}{A_{\text{вх}}} = \frac{\tau_c \cdot I_e}{l^2}, \quad (7.1)$$

де $\Delta\Phi_e$ - потік випромінювання;

E_e - опроміненість;

$A_{\text{вх}}$ - площа вхідної зіниці.

Потік на виході оптичної системи:

$$\Delta\Phi'_e = \tau_c \cdot \tau_o \cdot I_e \cdot \Delta\Omega = \frac{\tau_c \cdot \tau_o \cdot A_{\text{вх}} \cdot I_e}{l^2}, \quad (7.2)$$

де τ_o - коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Розрахунок опроміненості в зображенні випромінювача, тобто на виході оптичної системи, на відміну від розрахунку величини $\Delta\Phi'_e$ достатньо складний, оскільки для визначення закону розподілу потоку в зображенні необхідно враховувати як дифракцію, так і аберації, внесені системою.

Якщо випромінювач є селективним або прийом випромінювання здійснюється в деякому спектральному діапазоні $\lambda_1 \dots \lambda_2$, то, знаючи вигляд функції $\tau_{c\lambda} = \tau_c(\lambda)$ та $I_{e\lambda} = I_e(\lambda)$, можна визначити значення $\Delta\Phi_e$ і E_e для робочого діапазону довжин хвиль:

$$\Delta\Phi_{e\lambda_1-\lambda_2} = \frac{A_{\text{вх}}}{l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{c\lambda} \cdot I_{e\lambda} d\lambda, \quad (7.3)$$

Ці формули справедливі тільки для невеликих тілесних кутів $\Delta\Omega \approx \frac{A_{6x}}{l^2}$, в

межах яких сила випромінювання джерела постійна.

Розглянемо випадок, коли випромінювач кінцевої площі займає частину кутового поля оптичної системи. Енергетичною характеристикою такого випромінювача слугує яскравість L_e . На практиці розміри джерела випромінювання значно менші ніж відстань до нього. В цьому випадку використовують відому формулу для визначення потоку, що приходиться на вхідну зіницю від елемента з видимою площею ΔA , розташованого на осі системи:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot \int \int_{\sigma\psi} L_{e\sigma} \cdot \sin(\sigma) \cdot \cos(\sigma \cdot \Delta A) \cdot d\psi \cdot d\sigma \quad (7.4)$$

де $L_{e\sigma}$ - енергетична яскравість елемента (випромінювача) в напрямку σ ;

$\int \int_{\sigma\psi}$ - границі інтегрування по σ складають від $0 \dots \sigma_A$ (σ_A - апертурний кут системи) по ψ дорівнює $0 \dots 2\pi$ - для круглого випромінювача.

При косинусному (ламбертовському) випромінювачі, тобто, наприклад, для чорних та сірих випромінювачів $L_{e\sigma} = L_e = const$ маємо:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot \pi \cdot L_e \cdot \sin^2(\sigma_A) \cdot \Delta A \quad (7.5)$$

На виході оптичної системи:

$$\Delta\Phi'_e = \Delta\Phi_e \cdot \tau_0 = \tau_0 \cdot \tau_c \cdot \pi \cdot L_e \cdot \sin^2(\sigma_A) \cdot \Delta A \quad (7.6)$$

Якщо врахувати, що для $l \gg D$:

$$\sin^2(\sigma_A) \approx \frac{D^2}{4 \cdot l^2}, \quad (7.7)$$

де D - діаметр вхідної зіниці;
 l - відстань до випромінювача.

То отримаємо:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot \pi \cdot L_e \cdot \frac{D^2}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{A_{6x}}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A, \quad (7.8)$$

де $A_{6x} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці системи.

Опроміненість вхідної зіниці для даного випадку визначається наступним чином:

$$E_e = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{\Delta A}{l^2} \quad (7.9)$$

Для невеликих значень тілесного кута $\Delta\Omega_2 \approx \frac{\Delta A}{l^2}$, в межах якого $L_e = \text{const}$:

$$E_e = \tau_c \cdot L_e \cdot \Delta\Omega_2 \quad (7.10)$$

Аналогічно попередньому випадку при спектральній селективності випромінювання і пропускання середовища вираз для потоку на виході системи наступний:

$$\Phi_{e\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \Delta A}{4 \cdot l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{c\lambda} \cdot \tau_{0\lambda} \cdot E_{e\lambda} d\lambda, \quad (7.11)$$

Якщо випромінювач є сірим тілом з коефіцієнтом випромінювання ε_T , то з урахуванням закону Ламберта ($M_{e\lambda} = \pi \cdot L_{e\lambda}$) останній вираз набуває вигляду:

$$\Delta\Phi_{e\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\varepsilon_T \cdot D^2 \cdot \Delta A}{4 \cdot l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{c\lambda} \cdot \tau_{0\lambda} \cdot M_{e\lambda} d\lambda, \quad (7.12)$$

де $M_{e\lambda}$ - функція Планка.

Для інших умов роботи ОЕП по «площинному» випромінювачу наведені формули необхідно видозмінити.

Розглянемо наступний випадок – випромінювач перевищує розміри кутового поля, тобто перекриває все поле 2ω . Основною енергетичною характеристикою протяжного випромінювача є його яскравість L_e .

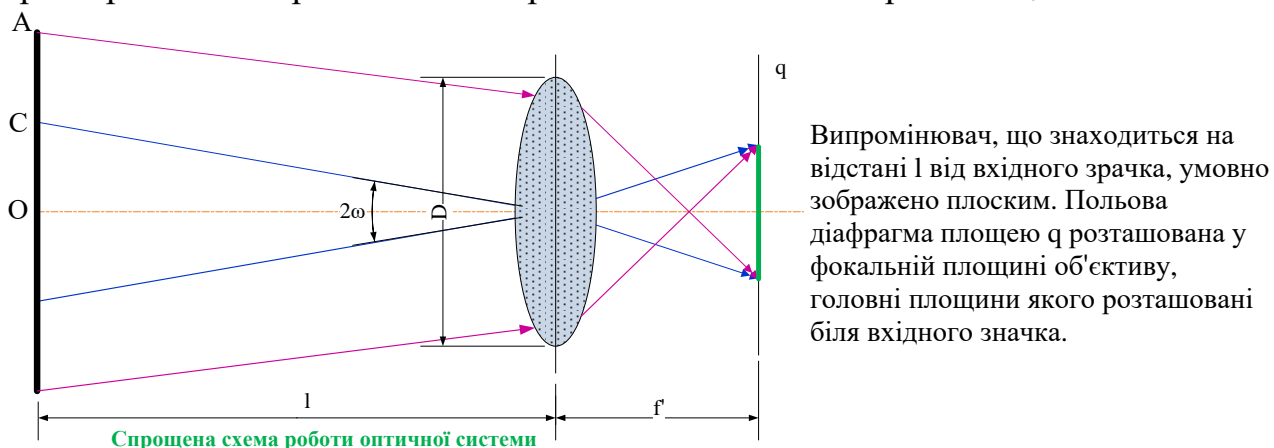


Рисунок 7.1 - Спрощена схема роботи оптичної системи

Якщо в такій схемі виконується умова $CO = l \cdot \text{tg}(\omega) \gg AC = \frac{D}{2}$, що при великій відстані l до випромінювача завжди має місце, то видима площа ΔA випромінювального протяжного джерела в основному визначається проекцією площі польової діафрагми на площину випромінювача.

Із найпростіших геометричних співвідношень видно:

$$\Delta A = \frac{q \cdot l^2}{f'^2} = \Delta \Omega_{\text{ОЕП}} \cdot l^2 \quad (7.13)$$

де $\Delta \Omega_{\text{ОЕП}} \approx \frac{q}{f'^2}$ - тілесне кутове поле ОЕП.

Підставляємо отримані формули у попередні вирази, отримаємо:

$$\Delta \Phi_e = \tau_c \cdot L_e \cdot q \cdot \frac{A_{\text{вх}}}{f'^2} = \tau_c \cdot L_e \cdot \Delta \Omega_{\text{ОЕП}} \cdot A_{\text{вх}}; E_e = \frac{\tau_c \cdot L_e \cdot q}{f'^2} \quad (7.14)$$

Для круглої вхідної зіниці:

$$\Delta \Phi'_e = \tau_0 \cdot \tau_c \cdot L_e \cdot \left(\frac{\pi \cdot q}{4} \right) \cdot \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (7.15)$$

Тобто очевидна залежність значень потоків та опроміненості від відносного отвору системи. Наведені формули можна використовувати для знаходження потоків або опроміненості, що створюються як джерелами корисних сигналів, так і джерелами перешкод або випромінювальними фонами. *Відповідні конкретним умовам роботи ОЕП їх поєднання складає основу енергетичного рівняння приладу.*

Розглянемо випадок роботи ОЕП активним методом.

Оскільки джерелом енергії випромінювання, що переносить корисний сигнал, при активному методі є передавальна оптична система, то визначимо потік випромінювання $\Delta \Phi_e$ на вхідній зіниці приймальної частини всією оптико-електронної системи.

Передавальна система 1, має яскравість джерела L_e , коефіцієнт пропускання τ_{01} та площу вихідної зіниці $A_{\text{вих}}$, спрямовує пучок променів на об'єкт 2, який розташований на відстані l_1 від неї (рис.7.2). Частина потоку, відбитого від об'єкту 2, потрапляє на вхідну зіницю площею $A_{\text{вх}}$ приймально оптико-електронної системи 3, яка розташована на відстані l_2 від об'єкту.

Оскільки в загальному випадку умови проходження пучком шляху l_1 і l_2 можуть бути різними, позначаємо через τ_{c1} та τ_{c2} відповідні коефіцієнти пропускання середовища на одиницю шляху.

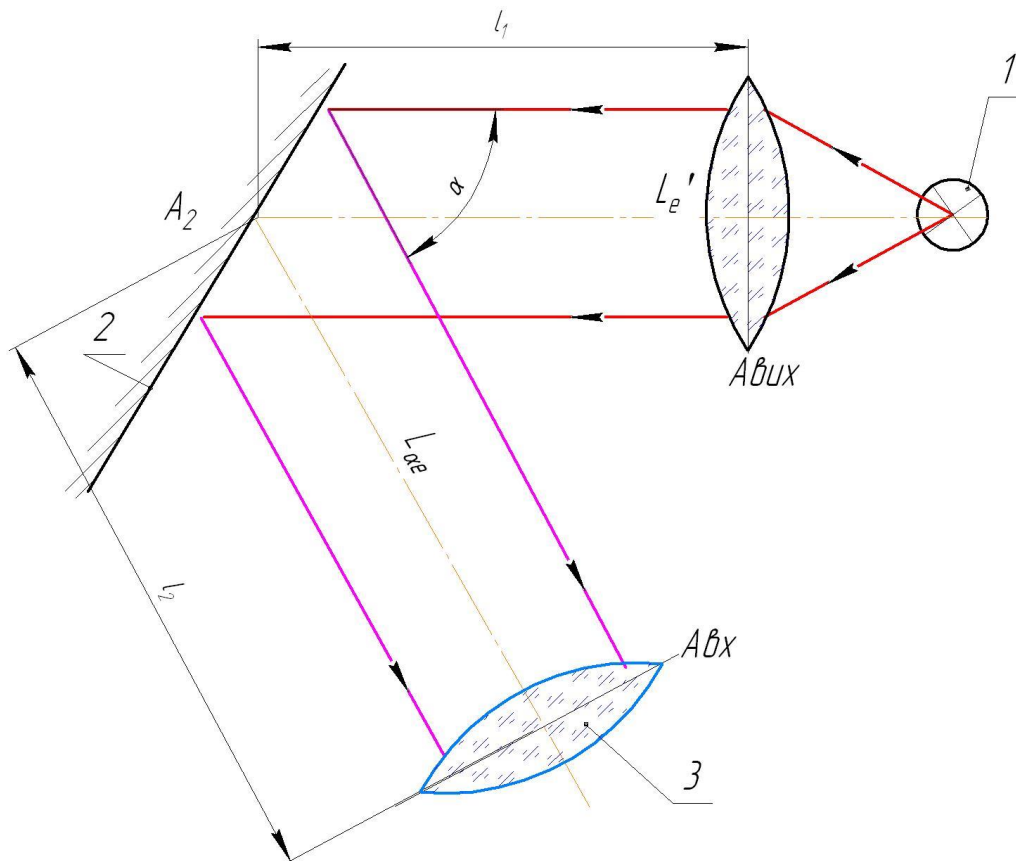


Рисунок 7.2 - До виводу формули

Коефіцієнт пропускання приймальної системи τ_{02} . При великих відстанях l_1 опроміненість в площині об'єкту 2 визначається:

$$E_e = \frac{\tau_{01} \cdot \tau_{c1}^{l1} \cdot L'_e \cdot A_{\text{вух}}}{l_1^2} = \frac{\tau_{c1}^{l1}}{l_1^2} \cdot I_{e0}, \quad (7.16)$$

де I_{e0} - осева сила випромінювання передавальної системи;

$L'_e = \left(\frac{n'}{n}\right) \cdot L_e$, n' , n - показники заломлення оптичних середовищ по обидві

сторони об'єктиву передавальної системи.

Після відбиття потоку від об'єкт 2 його можна розглядати як випромінювач для приймальної системи 3. Яскравість його за напрямком α визначається:

$$L_{e\alpha} = \frac{r_\alpha \cdot E_e}{\pi}, \quad (7.17)$$

де r_α - коефіцієнт яскравості поверхні об'єкту 2 (наприклад, для дифузного ламбертового відбивача цей коефіцієнт дорівнює коефіцієнту відбиття поверхні об'єкту ρ).

Тоді потік, що поступає на вхід приймальної системи від площадкового випромінювача:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c2}^{l2} \cdot L_{e\alpha} \cdot \frac{A_2 \cdot A_{ex}}{l^2} \quad (7.18)$$

де A_2 - видима із вхідної зіниці площа відбиваючої поверхні об'єкту.

З урахуванням всіх складових остаточно отримаємо:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c1}^{l1} \cdot \tau_{c2}^{l2} \cdot \tau_{o1} \cdot L'_e \cdot \frac{A_2 \cdot A_{ex} \cdot A_{вих} \cdot r_\alpha}{\pi \cdot (l_1 \cdot l_2)^2} \quad (7.19)$$

На виході приймальної системи маємо:

$$\Delta\Phi'_e = \Delta\Phi_e \cdot \tau_{o2} \quad (7.20)$$

Для конкретних умов наведені формули дещо видозмінюються, так при $l_1 = l_2 = l$; $A_{вих} = \frac{\pi \cdot D'^2}{4}$ - круглої вихідної зіниці, при дифузному характері відбиття поверхні об'єкту 2, тобто $r_\alpha = \rho$, та $\tau_{c1} = \tau_{c2}$, отримаємо потік:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c1}^{2l} \cdot \tau_{o1} \cdot \rho \cdot L'_e \cdot \frac{A_2 \cdot A_{ex} \cdot D'^2}{4 \cdot (l)^4} \quad (7.21)$$

Вирази для потоків або опроміненості, що створюються перешкодами або фонами, які знаходяться в кутовому полі приймальної системи, визначають аналогічно, як при пасивному методі роботи ОЕП. У сукупності з виразами корисного сигналу ф-ла (7.21) слугує для створення основного енергетичного рівняння приладу.

При активному методі роботи для покращення енергетичних співвідношень в системі, окрім таких заходів, як збільшення яскравості джерела та діаметру вихідної зіниці передавальної системи, досить ефективним є збільшення коефіцієнту r_α . Це можливо у тому випадку, якщо конструктор може змінювати конструкцію об'єкту 2. Наприклад, в оптико-електронних дальномірах застосовують кутові відбивачі, що встановлюються на об'єкті, відстань до якого вимірюється. Ці відбивачі мають властивість відбивати падаючий на них потік в тому ж напрямку, звідки цей потік прийшов. Отже, досягається помітне збільшення рівня корисного сигналу, що приходить на вхідну зіницю приймальної системи. Окрім того, можливо зменшити кутове поле приймальної системи, що сприяє зменшенню потоку від фону.

3. Виконання роботи

Завдання 1

Визначити опроміненість та потік на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при точковому опромінювачі АЛ102: $I = 0,1 \text{ мкд}$; $D_{\text{вх}} = 30 \text{ мм}$; $l = 50 \text{ мм}$.

Пропускання середовища 90 %, оптичної системи 95 %.

Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
$I, \text{мкд}$	0,1	Визначити із довідника (будь якого)						
$D_{\text{вх}}, \text{мм}$	30	24	34	35	40	45	47	50
$l, \text{мм}$	50	52	37	40	60	65	70	50
τ_c	90%	92	95	90	97	90	97	95
τ_o	95%	94	97	95	98	98	95	91
опромінювач	АЛ102	АЛ107	АЛ121	ЗЛ102А	ЗЛ360Б	АЛ307Б	ЗЛ102Б	ЗЛ102В

Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
$I, \text{мкд}$	Визначити із довідника (будь якого)							
$D_{\text{вх}}, \text{мм}$	50	55	35	25	35	37	42	45
$l, \text{мм}$	70	75	40	55	38	42	62	65
τ_c	90	95	92	95	96	92	95	97
τ_o	99	99	95	94	98	97	95	99
опромінювач	АЛ307Н	АЛ307Е	АЛ124	ЗЛ102Г	ЗЛ102Д	ИПД 04А- 1К	ИПД 04Б- 1К	КЛД901А

Рішення

1. Основною енергетичною характеристикою точкового випромінювача є сила випромінювання I_e . Для малих тілесних кутів потік $\Delta\Phi_e$ або опроміненість E_e на вхідній зіниці площею $A_{\text{вх}}$ розраховують:

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot I_e \cdot \Delta\Omega = \frac{\tau_c \cdot A_{\text{вх}} \cdot I_e}{l^2}; \quad E_e = \frac{\Delta\Phi_e}{A_{\text{вх}}} = \frac{\tau_c \cdot I_e}{l^2},$$

де $\Delta\Phi_e$ - потік, Вт;

E_e - опроміненість $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

$A_{\text{вх}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці системи;

$$A_{\text{вх}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (30 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 7,069 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Тоді світлотехнічний (фотометричний) потік випромінювання:

$$\Delta F = \frac{\tau_c \cdot A_{\text{вх}} \cdot I_e}{l^2} = \frac{0,9 \cdot 7,069 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{(50 \cdot 10^{-3})^2} = 2,54 \cdot 10^{-5} \text{ лм}.$$

*Примітка. Оскільки вихідні дані задані у світлотехнічних величинах, то необхідно отримане значення перевести в енергетичну систему одиниць. Це можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де

$$V_{max} = 680 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}.$$

$$\text{Отримаємо енергетичний потік } \Delta\Phi_e = \frac{\Delta F}{V_\lambda} = \frac{2,54 \cdot 10^{-5}}{680} = 3,742 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}.$$

2. Освітленість буде:

- світлотехнічна $E = \frac{\Delta F}{A_{\text{ex}}} = \frac{2,54 \cdot 10^{-5}}{7,06 \cdot 10^{-4}} = 0,036 \text{ лк};$
- енергетична $E_e = \frac{\Delta\Phi_e}{A_{\text{ex}}} = \frac{3,74 \cdot 10^{-8}}{7,06 \cdot 10^{-4}} = 5,29 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$

Потік на виході оптичної системи:

- світлотехнічна система

$$\Delta F' = \tau_o \cdot \Delta F = 2,54 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 2,417 \cdot 10^{-5} \text{ лм};$$

- енергетична система

$$\Delta\Phi_e = \tau_o \cdot \Delta\Phi_e = 3,742 \cdot 10^{-8} \cdot 0,95 = 3,555 \cdot 10^{-8} \text{ Вт},$$

де τ_o - коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Розрахунок опроміненості в зображенні випромінювача, тобто на виході оптичної системи, на відміну від розрахунку величини $\Delta\Phi_e'$ достатньо складний, оскільки для визначення закону розподілу потоку в зображенні необхідно враховувати як дифракцію, так і аберації, внесені системою.

Завдання 2

Визначити опроміненість та потік на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при ламбертовому опромінювачі з видимою площею $\Delta A = 20 \text{ мм}$, $L = 0,05 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$; $D_{\text{ex}} = 40 \text{ мм}$; $l = 25 \text{ мм}$. Пропускання середовища 92 %, оптичної системи 97 %.

Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
$L, \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$	0,05	0,057	0,64	0,35	0,15	0,2	0,25	0,3
$\Delta A, \text{мм}$	20	24	28	25	30	35	30	36
$D_{\text{ex}}, \text{мм}$	40	42	35	34	35	40	37	39
$l, \text{мм}$	25	34	20	28	25	30	38	41
τ_c	92%	95	92	95	94	95	92	93
τ_o	97%	94	95	97	96	97	95	97

Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
$L, \text{кд}/\text{м}^2$	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,05	0,1	0,17
$\Delta A, \text{мм}$	40	50	20	40	52	10	15	14
$D_{\text{вх}}, \text{мм}$	45	40	42	25	50	8	20	26
$l, \text{мм}$	35	40	45	35	40	12	22	34
τ_c	90	91	95	90	93	94	95	97
τ_o	98	99	97	95	98	98	97	99

Рішення

1. Розглянемо випадок, коли випромінювач кінцевої площі займає частину кутового поля оптичної системи. Енергетичною характеристикою такого випромінювача слугує яскравість L_e .

Потік випромінювання на вході визначаємо за формулою (7.20):

$$\Delta\Phi_e = \tau_c \cdot \pi \cdot L_e \cdot \frac{D^2}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{A_{\text{вх}}}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A,$$

де $A_{\text{вх}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа входної зіниці системи;

D - діаметр входної зіниці;

l - відстань до випромінювача.

$$\Delta F = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{A_{\text{вх}}}{4 \cdot l^2} \cdot \Delta A = 0,92 \cdot 0,05 \cdot \frac{1,257 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 4,624 \cdot 10^{-4} \text{ лм}.$$

*Примітка. Оскільки вихідні дані задані у світлотехнічних величинах, то необхідно отримане значення перевести в енергетичну систему одиниць. Це можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видності $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де

$$V_{\text{max}} = 680 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}. \text{ Маємо } \Delta\Phi_e = \frac{\Delta F}{V_\lambda} = \frac{4,624 \cdot 10^{-4}}{680} = 6,801 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}.$$

2. На виході оптичної системи потік визначаємо за формулою (7.20):

$$\Delta\Phi'_e = \Delta\Phi_e \cdot \tau_o.$$

Тоді маємо потік на виході оптичної системи:

- світлотехнічна система

$$\Delta F' = \tau_o \cdot \Delta F = 4,624 \cdot 10^{-4} \cdot 0,97 = 4,486 \cdot 10^{-4} \text{ лм};$$

- енергетична система

$$\Delta\Phi'_e = \tau_o \cdot \Delta\Phi_e = 6,801 \cdot 10^{-7} \cdot 0,97 = 6,597 \cdot 10^{-7} \text{ Вт},$$

де τ_o - коефіцієнт пропускання оптичної системи.

3. Опроміненість вхідної зіниці для даного випадку визначається наступним чином:

- світлотехнічна $E = \tau_c \cdot L \cdot \frac{\Delta A}{l^2} = 0,92 \cdot 0,05 \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{(25 \cdot 10^{-3})^2} = 1,472 \text{ лк};$

- енергетична

$$E_e = \tau_c \cdot L_e \cdot \frac{\Delta A}{l^2} = 0,92 \cdot 7,353 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{(25 \cdot 10^{-3})^2} = 2,165 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Завдання 3

Визначити опроміненість та потік на вхідній та вихідній зіниці оптичної системи при ламбертовому опромінювачі (що перевищує розміри кутового поля) $L = 0,07 \text{ кд/м}^2$; $D_{\text{вх}} = 35 \text{ мм}$; $l = 100 \text{ мм}$; $f' = 15 \text{ мм}$; $d = 25 \text{ мм}$ (діаметр польової діафрагми)

Пропускання середовища 90 %, оптичної системи 95 %

Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
$L, \text{кд/м}^2$	0,05	Із завдання 2						
$f', \text{мм}$	15	25	38	40	17	22	25	27
$D_{\text{вх}}, \text{мм}$	35	Із завдання 2						
$d, \text{мм}$	25	20	25	28	30	35	30	37
$l, \text{мм}$	100	105	110	95	90	97	100	102
$\tau_c, \%$	90	Із завдання 2						
$\tau_o, \%$	95							

Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
$L, \text{кд/м}^2$	Із завдання 2							
$f', \text{мм}$	22	27	29	35	34	27	15	18
$D_{\text{вх}}, \text{мм}$	Із завдання 2							
$d, \text{мм}$	20	25	28	30	35	30	37	28
$l, \text{мм}$	105	110	95	90	97	100	102	115
$\tau_c, \%$	Із завдання 2							
$\tau_o, \%$								

Рішення

Для розгляду використовується рис.7.1.

1. Потік випромінювання на вході визначаємо за формуло (7.18)-(7.21)

$$\Delta \Phi_e = \tau_c \cdot L_e \cdot q \cdot \frac{A_{\text{вх}}}{f'^2},$$

де q - площа польової діафрагми

$$q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 4,909 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

ΔA - видима площа випромінювального протяжного джерела

$$\Delta A = \frac{q \cdot l^2}{f'^2} = \frac{4,909 \cdot 10^{-4} \cdot (100 \cdot 10^{-3})^2}{(15 \cdot 10^{-3})^2} = 0,022 \text{ м}^2;$$

$$A_{\text{ex}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \text{площа вхідної зіниці системи}$$

$$A_{\text{ex}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (35 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 9,621 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\Delta F = \tau_c \cdot L \cdot q \cdot \frac{A_{\text{ex}}}{f'^2} = \frac{0,9 \cdot 0,07 \cdot 4,909 \cdot 10^{-3} \cdot 9,621 \cdot 10^{-4}}{(15 \cdot 10^{-3})^2} = 2,592 \cdot 10^{-4} \text{ лм}.$$

*Примітка. Оскільки вихідні дані задані у світлотехнічних величинах, то необхідно отримане значення перевести в енергетичну систему одиниць. Це можна виконати застосовуючи коефіцієнт відносної видимості $V_\lambda = \frac{F}{\Phi_e}$, де

$$V_{\text{max}} = 680 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}. \text{ Маємо } \Delta \Phi_e = \frac{\Delta F}{V_\lambda} = \frac{2,592 \cdot 10^{-4}}{680} = 3,812 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}.$$

2. На виході оптичної системи потік визначаємо за формулою (7.15)

- світлотехнічна система $\Delta F' = \tau_0 \cdot \tau_c \cdot L \cdot \left(\frac{\pi \cdot q}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{f'}\right)^2 = 1,256 \cdot 10^{-4} \text{ лм};$
- енергетична система $\Delta \Phi'_e = \tau_0 \cdot \tau_c \cdot L_e \cdot \left(\frac{\pi \cdot q}{4}\right) \cdot \left(\frac{D}{f'}\right)^2 = 1,847 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}.$

Тобто очевидна залежність значень потоків та опроміненості від відносного отвору системи.

3. Опроміненість вхідної зіниці для даного випадку визначається наступним чином:

- світлотехнічна $E = \frac{\tau_c \cdot L \cdot q}{f'^2} = 0,137 \text{ лк};$
- енергетична $E_e = \frac{\tau_c \cdot L_e \cdot q}{f'^2} = 2,021 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$

Завдання 4

Визначити потік випромінювання на вході та виході ОЕП при роботі активним методом.

Варіант	приклад	1	2	3	4	5	6	7
джерело випромінювання	ОП-11-40	ОП6-25	ОП-12-100	ОП8-100	ОП6-15	ОП13-15	ОП13-50	ОП8-0,6
$F, \text{лм}$	Вибрати із довідника							
діаметр джерела, мм	20	Вибрати із довідника						
$D_{\text{вих}}, \text{мм}$	25	25	30	32	35	38	41	45
$d_{\text{вх}}, \text{мм}$	25	28	35	35	32	34	39	47
$l_1, \text{мм}$	100	110	120	125	130	95	97	99
$l_2, \text{мм}$	150	180	150	122	125	130	135	137
τ_c	0,95	0,9	0,95	0,9	0,92	0,95	0,97	0,98
τ_{o1}, τ_{o2}	0,97; 0,98	0,95; 0,97	0,97; 0,99	0,92; 0,93	0,95; 0,96	0,97; 0,98	0,96; 0,96	0,94; 0,94

Варіант	8	9	10	11	12	13	14	15
джерело випромінювання	ОП8-3,2	ОП8-9	ОП33-0,3	ОП6-25	ОП-12-100	ОП8-100	ОП6-15	ОП13-15
$F, \text{лм}$	Вибрати із довідника							
діаметр джерела, мм	Вибрати із довідника							
$D_{\text{вих}}, \text{мм}$	27	22	31	33	34	34	40	44
$d_{\text{вх}}, \text{мм}$	23	29	34	36	33	31	38	45
$l_1, \text{мм}$	105	111	124	122	131	97	98	100
$l_2, \text{мм}$	154	187	151	125	122	132	133	135
τ_c	0,92	0,91	0,94	0,91	0,91	0,92	0,93	0,94
τ_{o1}, τ_{o2}	0,97; 0,97	0,95; 0,95	0,97; 0,97	0,92; 0,92	0,95; 0,95	0,98; 0,98	0,96; 0,95	0,94; 0,94

Рішення

1. Оскільки джерелом енергії випромінювання, що переносить корисний сигнал, при активному методі є передавальна оптична система, то визначимо потік випромінювання $\Delta\Phi_e$ на вхідній зіниці приймальної частини всією оптико-електронної системи:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c1}^{2l} \cdot \tau_{o1} \cdot \rho \cdot L'_e \cdot \frac{A_2 \cdot A_{\text{вх}} \cdot D'^2}{4 \cdot (l)^4},$$

де τ_c - коефіцієнт пропускання середовища розповсюдження випромінювання;

τ_{o1} - коефіцієнт пропускання оптичної системи;

ρ - коефіцієнт дифузного відбиття поверхні об'єкту;

L'_e - енергетична яскравість джерела $L_e = \frac{I_e}{S_{\text{дж}} \cdot \cos(\alpha)}$;

I_e - енергетична сила світла джерела випромінювання, $\frac{Вт}{ср}$;

S - площа випромінювальної площадки джерела випромінювання, $м^2$;

A_2 - видима із вхідної зіниці площа відбиваючої поверхні об'єкту;

$A_{вх} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - площа вхідної зіниці системи;

D' - діаметр вихідної зіниці.

Визначаємо параметри, що входять до цієї формули.

2. Для заданого джерела ОП-11-40 із довідникових даних визначаємо:

- світловий потік випромінювання $F=840$ лм; енергетичний потік

$$\Phi_e = \frac{F}{V_\lambda} = \frac{840}{680} = 1,235 \text{ Вт};$$

- діаметр колби 20 мм.

Тоді, що визначити яскравість $L_e = \frac{I_e}{S_{дж} \cdot \cos(\alpha)}$ необхідно

$$I_e = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\Phi}{4 \cdot \pi} = \frac{1,235}{4 \cdot \pi} = 0,0983 \text{ Вт/ср},$$

$$S_{дж} = \frac{\pi \cdot d_{дж}^2}{4} = 3,142 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Маємо енергетичну яскравість

$$L_e = \frac{I_e}{S_{дж} \cdot \cos(\alpha)} = \frac{0,0983}{3,142 \cdot 10^{-4} \cdot \cos(60^\circ)} = 625,807 \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

3. Опроміненість в площині об'єкту 2 визначається:

$$E_e = \frac{\tau_{01} \cdot \tau_{c1}^{I1} \cdot L_e' \cdot A_{вих}}{l_1^2} = \frac{0,97 \cdot 0,95 \cdot 625,807 \cdot 4,909 \cdot 10^{-4}}{(100 \cdot 10^{-3})^2} = 28,308 \text{ Вт/м}^2.$$

Після відбиття потоку від об'єкт 2 можна розглядати як випромінювач для приймальної системи 3. Яскравість його за напрямком α визначається:

$$L_{e\alpha} = \frac{r_\alpha \cdot E_e}{\pi} = \frac{0,3 \cdot 28,308}{\pi} = 2,703 \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2,$$

де r_α - коефіцієнт яскравості поверхні об'єкту 2 (наприклад, для дифузного ламбертового відбивача цей коефіцієнт дорівнює коефіцієнту відбиття поверхні об'єкту $\rho=0,3$).

4. Тоді потік, що поступає на вхід приймальної системи від площадкового випромінювача:

$$\Delta\Phi_e = \tau_{c2}^{l2} \cdot L_{ex} \cdot \frac{A_2 \cdot A_{ex}}{l_2^2} = 0,95 \cdot 2,703 \cdot \frac{1,257 \cdot 10^{-3} \cdot 4,909 \cdot 10^{-4}}{(50 \cdot 10^{-3})^2} = 7,04 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$$

При цьому видима із вхідної зіниці площа відбиваючої поверхні об'єкту

$$d_2 = \frac{d_{ex}}{\cos(60^\circ)} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{\cos(60^\circ)} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Тоді площа $A_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 1,257 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

5. На виході приймальної системи маємо:

$$\Delta\Phi'_e = \Delta\Phi_e \cdot \tau_{o2} = 7,04 \cdot 10^{-5} \cdot 0,98 = 6,899 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$$

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Назвіть особливості роботи ОЕП в пасивному і активному режимі
2. Що є основною енергетичною характеристикою точкового випромінювача. Як вона розраховується.
3. Як визначається потік випромінювання та опроміненість для селективного приймача.
4. Що таке ламбертівський випромінювач. Як для нього визначається потік випромінювання та опроміненість.
5. Що таке вхідна та вихідна зіниці ОЕП. Як залежить потік випромінювання та опроміненість від цих параметрів.

Література

1. Кравченко І.В. Моделювання оптико-електронних приладів: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / І. В. Кравченко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 113с.
2. Keiser, Gerd, and Gerd Keiser. Fiber optic communication networks. Springer Singapore, 2021.
3. Шуаїбов О.К. Підручник «Квантова електроніка для інженерів»: – ДВНЗ «УжНУ», кафедра квантової електроніки, фізичний факультет. 2022. – 133 с.
4. Сучасні оптичні технології та системи. Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 56 с.
5. Комп'ютерні методи проектування оптико-механічних систем. [Електронний ресурс]: навч.посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт.

програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спец.: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. К. Кучеренко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. –169 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №8 ВОЛОКОННА ОПТИКА

Мета роботи

1. Ознайомитися з принципом розповсюдження світла в оптоволокну.
2. Підібрати джерело та приймач оптичного випромінювання.

Розраховувати оптоволоконний датчик тиску.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Основні закони геометричної оптики.
2. Закон повного внутрішнього відбиття світла.
3. Конструкції оптоволоконних датчиків.

2. Теоретичні відомості

2.1 Принцип розповсюдження світла по оптоволокну

Оптичне волокно, як показано на рис.8.1, складається із осердя, по якому розповсюджується світло, і оболонки. Остання, в свою чергу, знаходиться в плетінні, яке захищає поверхню волокна, підвищує його міцність і тим самим спрощує експлуатацію.

Процеси, що проходять в плоскому діелектричному хвильоводі, інтерпретуються на основі геометричної оптики, яка по необхідності доповнюється більш загальною хвильовою оптикою.

В основі транспортування світлового променя по світловоду лежить явище його повного внутрішнього відбиття від границі розділу з більш оптично щільного до менш оптично щільного середовища.

Світло із середовища з показником заломлення n (зазвичай повітря) потрапляє в осердя з показником заломлення n_1 і піддається повному внутрішньому відбиттю на границі з оболонкою, яка має показник заломлення n_2 .

Критичний кут, при якому має місце *повне внутрішнє відбиття* виражається формулою:

$$\sin(\alpha_{кр}) = \frac{n_2}{n_1} \quad (8.1)$$

Коефіцієнт заломлення n_1 осердя лише незначно перевищує коефіцієнт заломлення n_2 оболонки, тому світло, що введене в осердя з торця волокна, повністю відбивається від границі розділу осердя і оболонки, наче б то закривається в осерді і розповсюджується тільки в ньому.

Для **повного внутрішнього відбиття** світла, що входить в волокно під кутом θ , необхідно, щоб виконувалась умова [3]:

$$0 \leq \theta \leq \text{arcSin}(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}) = \theta_{\max} \quad (8.2)$$

Промені світла, що падають на границю розділу під кутом меншим критичного, потрапляють в оболонку і в подальшому поглинається покриттям (захисною оболонкою). Промені світла, що прийшли до границі розділу під кутом більшим критичного, повністю відбиваються, постійно повторюючись, що забезпечує розповсюдження випромінювання вздовж світловоду.

Виходячи із закону заломлення критичний кут може бути зв'язаний з кутом падіння променя в осердя наступною залежністю [3]:

$$\begin{aligned} n \cdot \text{Sin}(\Theta) &= n_1 \cdot \text{Sin}(90^\circ - \alpha_{\text{кр}}) = n_1 \cdot \text{Cos}(\alpha_{\text{кр}}) = n_1 \cdot \sqrt{1 - \text{Sin}^2(\alpha_{\text{кр}})} = \\ &= n_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \quad (8.3)$$

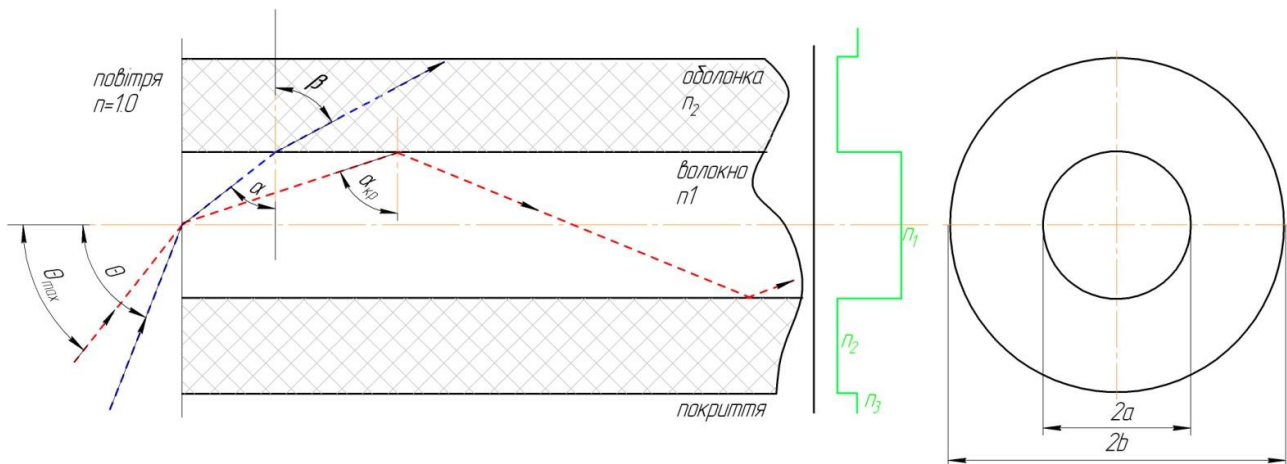


Рисунок 8.1 - Типова структура оптичного волокна і розповсюдження світла в ньому (штриховою синьою лінією показано промінь, який після заломлення виходить із волокна через оболонку; штрихова лінія (червона) зображує промінь, що має повне внутрішнє відбиття всередині волокна)

Оскільки різниця між коефіцієнтами заломлення в осерді і оболонці лежить в межах 0,01, то величину θ_{\max} можна представити в наступному вигляді [3]:

$$\theta_{\max} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (7.4)$$

Кут θ_{\max} – це максимально можливий кут, під яким світло може проходити в оптичне волокно, тобто прийматися ним, називається числовою апертурою і позначається NA (Numerical Aperture) [3]

При розгляді оптичних волокон замість різниці n_1 і n_2 частіше всього користуються величиною, що називається відносною різницею коефіцієнтів заломлення:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (7.5)$$

2.2 Волоконно-оптичні датчики в техніці [4]

Волоконно-оптичні датчики за характером використання оптичного волокна розділяються на два типи:

1. в яких волокно слугує тільки для передачі сигналів;
2. в яких волокно є власне чутливим елементом.

Волоконно-оптичні датчики, в яких оптичне волокно слугує лінією для розповсюдження світла, розділяють на датчики з оптичним перетворенням і датчики з оптичним зондом.

Датчик з оптичним перетворенням рис.8.2 а представляє собою систему, що містить оптичний матеріал або чутливий до механічної дії оптичний елемент, який перетворює зміну параметрів зовнішнього середовища в зміну параметрів світлового променя.

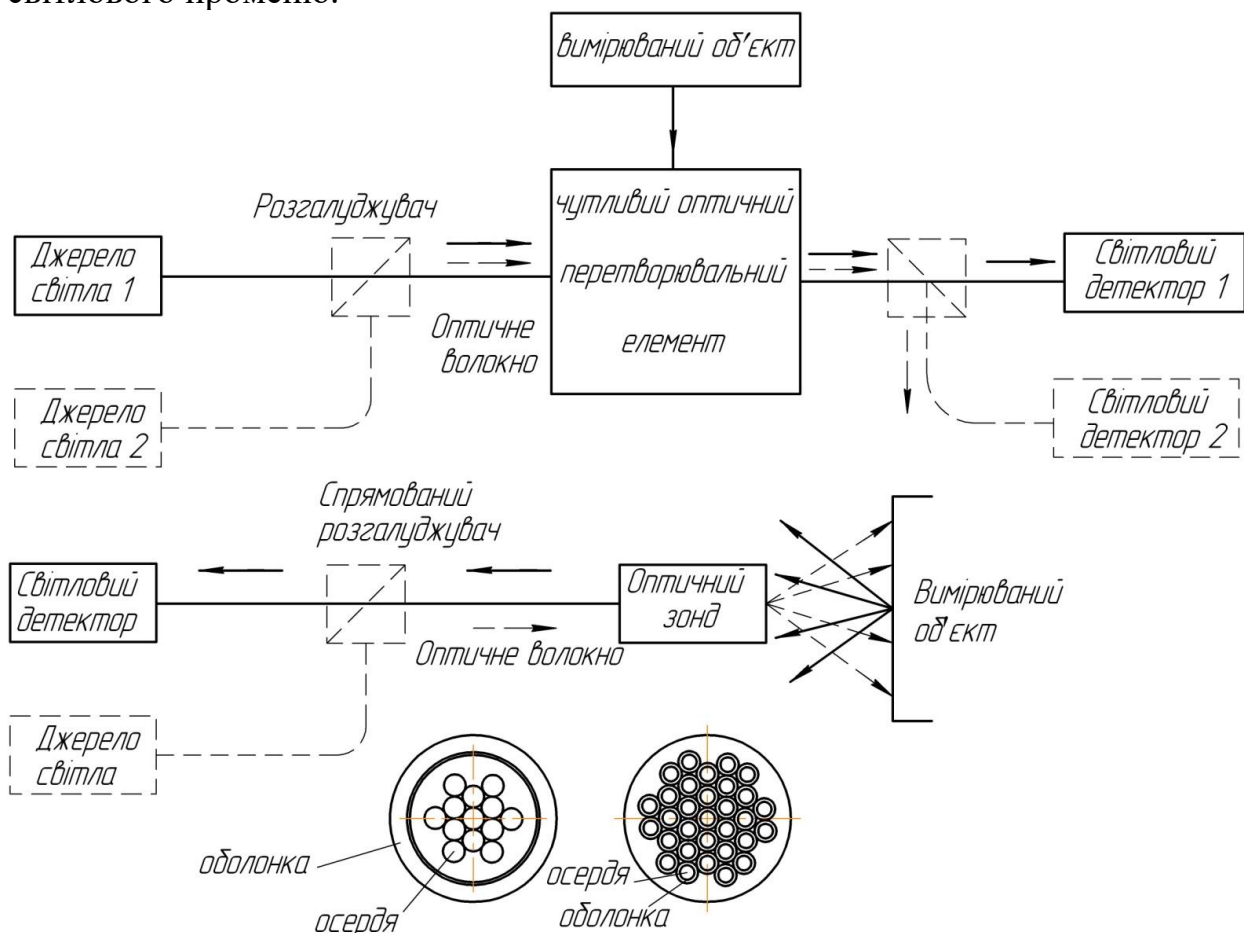


Рисунок 8.2 - Схеми датчиків: а) з оптичним перетворювачем; б) з оптичним зондом [4]

Перетворювач розташований між торцями передаючого і приймаючого волокна. Використовуються багатомодові волокна і пучки волокон. В якості джерела світла частіше за все використовують світлодіоди з малими шумами, а в якості детектора світла – рпн – фотодіоди, що мають термостабільні характеристики. Датчики цієї системи прості по конструкції і, як правило, високо надійні.

Схема датчика з зондом із оптичного волокна приведена на рис.8.2 б. Тут світлова інформація, випромінююча, відбита або розсіяна об'єктом вимірювання, виділяється за допомогою сенсорної головки, що складається із відповідного об'єктиву і оптичного волокна, і поступає в світловий детектор. Використовуються різні оптичні волокна (одномодові, багатомодові), а також волоконні пучки (джгути). Волоконні пучки представляють собою кабель із множини оптичних волокон або конструкцію із множини осердя з загальною оболонкою рис.8.2. В будь якому випадку загальний діаметр оптоволоконної конструкції – в межах 10 мм. При цьому в багатоосердевому волокні діаметр кожного осердя складає 4-12 мкм, а в волокні типу багатожилкового кабелю кожне оптичне волокно має діаметр 14-30 мкм, тому щільність елементів зображення в першому вища.

Датчик тиску із відбивною діафрагмою[4]

На рис.8.3 представлена структурна схема датчика тиску, в якому використовується зміна діафрагмою умов відбиття світла. Волоконно-оптичний джгут складається із передаючих і приймаючих волокон. Світло, що вводиться в передаючі волокна, відбивається діафрагмою. При цьому коефіцієнт зв'язку між передаючими і приймаючими волокнами змінюється у відповідності з положенням діафрагми, яка в свою чергу залежить від тиску. Датчик тиску використовується в діапазоні, де залежність інтенсивності світла від зазору порівняно лінійна. Оpubліковані відомості про датчик тиску, в якому використовуються джгут діаметром 2 мм із 100 оптичних волокон і діафрагма із нержавіючої сталі товщиною 15 мкм. Цим датчиком вимірюють тиск до $2,7 \cdot 10^4$ Па. Подібні датчики використовують для вимірювання тиску рідких середовищ.

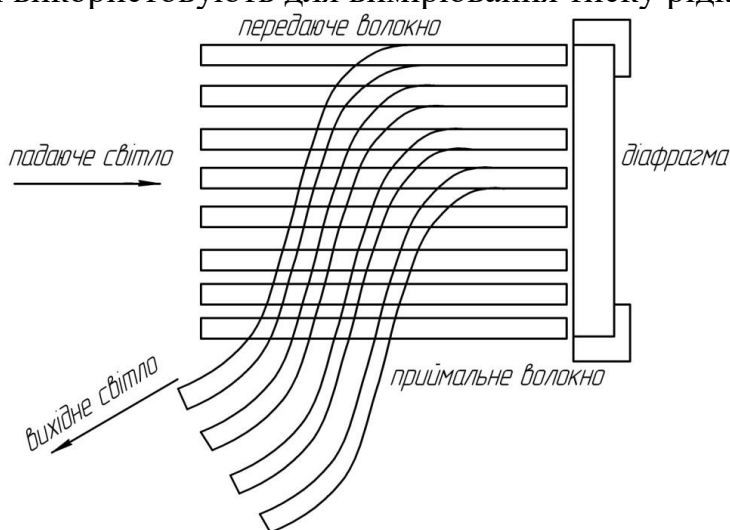


Рисунок 8.3 - Датчик тиску із відбивною діафрагмою [4]

Ендоскоп технічний гнучкий керований

Наочник окуляру ізолює спостерігача від дотику з металевими частинами. Приєднувальні розміри наочника відповідають стандартам DIN

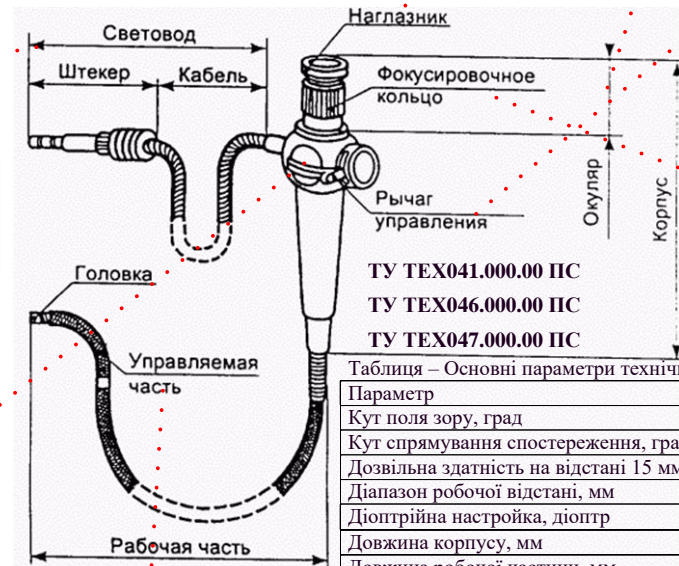
Світлопровід ендоскопу складається із кабелю та штекера. Кабель світлопроводу захищений від механічних пошкоджень зовнішньою корозійно-стійкою витою оболонкою

Ендоскоп технічний гнучкий керований (модель 041, 046, 047)

Призмонасадка, закріплюється до корпусу ендоскопа і закривається захисним ковпачком. Насадка призначена для зміни кута напрямку спостереження на 90, що у поєднанні із вигином головки на 90 забезпечує кут напрямку спостереження 180.

Керована частина робочої частини може бути повернута (загнута) ричагом керування корпусу в площині вигину на кут 90. При цьому мінімальний розмір порожнини, необхідний для безперешкодного загибу головки в одну сторону, дорівнює 40 мм. Керована частина закінчується оптичною головкою прямого спостереження.

Робоча частина ендоскопа, виконана гнучкою, герметичною, бензино-олієстійкою, захищеною сорочкою із нержавіючої сталі.



Окуляр, призначений для формування зображення розглядуваного об'єкту

Ричаг керування, розташований на корпусі ендоскопа, призначений для переміщення (загибу) керованої частини з головкою. З цією метою ричаг керування повільно переміщують у напрямку повздовжньої геометричної осі корпусу.

Фокусувальне кільце використовують для індивідуального налагодження окуляру під око оператора. Налаштування виконують обертом кільця.

При використанні з освітлювачем призначений для огляду внутрішнього або важкодоступного простору тільки технічних об'єктів.

Таблиця – Основні параметри технічних ендоскопів

Параметр	Модель 041	Модель 046	Модель 047
Кут поля зору, град	55		
Кут спрямування спостереження, град	0,9		
Дозвільна здатність на відстані 15 мм, лін/мм	4	5	3
Діапазон робочої відстані, мм	10-100		
Діоптрійна настройка, діоптр	±5		
Довжина корпусу, мм	240	-	240
Довжина робочої частини, мм	500, 1000, 1500		
Максимальний зовнішній діаметр робочої частини, мм	6		8
Довжина керованої частини, мм	50		
Діапазон кутів відхилень керованої частини, град	±90		
Мінімальний радіус вигину робочої частини, мм	20	80	
Маса, кг	0,5		

Ендоскоп складається із трьох основних частин: передачі зображення, передачі світла та механічної. Система передачі зображення транслює зображення об'єкту до ока спостерігача. Вона складається із об'єктива, який передає зображення об'єкту на вхідний торець волоконного джгута, який складається із регулярно вкладених волокон, що передають зображення об'єкту в вхідного торця джгута на вихідний торець, а також окуляра, через який спостерігач розглядає об'єкт на вихідному торці волоконно-оптичного джгута.

Система передачі світла транслює світло по всій довжині ендоскопа від джерела світла до спостережного об'єкту. Вона виконана у вигляді нероз'ємного світлового джгута, встановленого у ендоскопі. За допомогою роз'єму шланг ендоскопа приєднується до роз'єму освітлювача. Механічна система забезпечує керування вигином робочої частини ендоскопу.

3. Виконання роботи

Завдання 1. Розрахунок датчику тиску із відбивною діафрагмою

Варіант	Діапазон вимірювання тиску, Па		Довжина хвилі джерела, λ_{max} , мкм	Коефіцієнт заломлення волокна	Δ , %	Відстань l , мм	d, мм
	min	max					
1	$0,5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	0,92	1,45	1	1	2
2	$0,65 \cdot 10^4$	$2,75 \cdot 10^4$	0,95	1,47	1,5	1,25	2,2
3	$0,52 \cdot 10^4$	$2,57 \cdot 10^4$	0,88	1,5	2	1,5	2,4
4	$0,45 \cdot 10^4$	$2,78 \cdot 10^4$	0,81	1,52	1	1,75	2,6
5	$0,59 \cdot 10^4$	$2,71 \cdot 10^4$	0,96	1,55	1,5	2	2,8
6	$0,47 \cdot 10^4$	$2,86 \cdot 10^4$	0,85	1,61	2	2,25	3,0
7	$0,3 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$	0,81	1,45	1,5	2	2,1
8	$0,35 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^5$	0,92	1,52	1,7	2,5	2,3
9	$0,4 \cdot 10^5$	$4,1 \cdot 10^5$	0,95	1,47	2	3	2,5
10	$0,45 \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^5$	0,88	1,55	1	3,5	2,7
11	$0,5 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^5$	0,81	1,61	1,5	3	2,9
12	$0,3 \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^5$	0,96	1,52	1,7	1,5	2
13	$0,25 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^5$	0,85	1,5	2	2	2,2
14	$0,38 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^5$	0,92	1,46	1,5	2,8	2,4
15	$0,18 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	0,95	1,52	2	5	2,6

Приклад 8.1

Дано: світловолоконний джгут діаметром 2 мм; кількість волокон 100 шт; максимальний вимірюваний тиск $2,7 \cdot 10^4$ Па; товщина діафрагми 150 мкм; матеріал діафрагми нержавіюча сталь. Всі інші дані необхідні для розрахунку вибрати самостійно із конструктивних міркувань.

Рішення

1. Виконуємо підбір джерела і приймача випромінювання за спектральним діапазоном, випромінюючою потужністю та спектральною чутливістю приймача.

В якості джерела випромінювання вибираємо світло діод АЛ124 для якого:

- довжина хвилі $\lambda_{max} = 0,85$ мкм;
- потужність випромінювання 4 мВт.

За спектральними характеристиками підбираємо фотодіод ФД-256 для якого:

- довжина хвилі $\lambda_{max} = (0,75 - 0,9)$ мкм;
- темновий струм $I_T = 0,005$ мА;

- спектральна чутливість $S_{\lambda} = 6 \frac{мА}{лм}$.

2. Сердечник оптичного волокна має коефіцієнт заломлення 1,47, а відносна різниця коефіцієнтів заломлення $\Delta=1\%$.

Розраховуємо числову апертуру оптичного волокна:

$$NA = n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} = 1,47 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,01} = 0,21.$$

Визначаємо кута Θ , під яким світловий потік входить в світловод:

$$0 \leq \theta \leq \arcsin(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}) = \theta_{max},$$

$$0 \leq \theta \leq \arcsin(\sqrt{1,47^2 - 1,455^2}) = 12,09^\circ.$$

Для визначення кута Θ , під яким світловий потік входить в світловод необхідно знати показник заломлення n_2 . Визначаємо його із формули:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \Rightarrow$$

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - 0,01 \cdot 2 \cdot n_1^2} = \sqrt{1,47^2 - 0,01 \cdot 2 \cdot 1,47^2} = 1,455.$$

3. Оскільки світловий промінь проходить із середовища з меншим показником заломлення в середовище з більшим показником, то цей промінь піддається заломленню. Визначаємо кут заломлення променя, що падає на границю розділу повітря світловод. Використовуємо закон заломлення променів:

$$\frac{\sin(\varepsilon)}{\sin(\varepsilon')} = \frac{n'}{n} \Rightarrow$$

$$\varepsilon' = \arcsin\left(\frac{n \cdot \sin(\varepsilon)}{n'}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot \sin(12^\circ)}{1,47}\right) = 8^\circ 13'.$$

*В цьому випадку кут падіння ε відповідає куту Θ .

Промінь, що розповсюджується в світловоді піддається повному внутрішньому відбиттю від оболонки волокна, оскільки показник заломлення оболонки менший за показник заломлення сердечника. Тому промінь, що заломився на поверхні розділу повітря-сердечник буде відбиватися від поверхні сердечник-оболонка.

Проводимо нормаль до точки падіння променя. Визначаємо кут падіння із прямокутного трикутника від складає $81^\circ 50'$. Промінь вийде із волокна під таким же кутом, що і ввійшов, тобто $12^\circ 10'$ рис.8.5.

4. Оскільки довжина хвилі джерела випромінювання відноситься до невидимої області спектру, тому для розрахунку використовуємо **енергетичну систему одиниць**.

Визначаємо енергетичну освітленість об'єкту вимірювання:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S_2} = \frac{I_e \cdot \cos(\alpha)}{l^2};$$

$$E_{e\min} = \frac{\Phi_e}{S_2} = \frac{I_e \cdot \cos(\alpha)}{(l - \delta_{A\min})^2} = \frac{F \cdot \cos(\alpha)}{(l - \delta_{A\min})^2 \cdot \omega} =$$

$$= \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(12^\circ 10')}{(1 \cdot 10^{-3} - 9,823 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 4 \cdot \pi} = 321,383 \frac{\text{Bm}}{\text{м}^2},$$

$$E_{e\max} = \frac{\Phi_e}{S_2} = \frac{I_e \cdot \cos(\alpha)}{(l - \delta_{A\max})^2} = \frac{F \cdot \cos(\alpha)}{(l - \delta_{A\max})^2 \cdot \omega} =$$

$$\frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(12^\circ 10')}{(1 \cdot 10^{-3} - 2,554 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 4 \cdot \pi} = 331,834 \frac{\text{Bm}}{\text{м}^2},$$

де I_e - енергетична сила світла, $I_e = \frac{F}{\omega} = 3,183 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Bm}}{\text{ср}}$;

l - відстань від джерела до площадки, м;

α - кут під яким промені падають на площадку.

Як видно із формули енергетична освітленість залежить від відстані до джерела випромінювання. Оскільки втрати в світловолокні досить малі, тому можна вважати, що потік випромінювання повністю без втрат передається від джерела випромінювання до кінця світловоду. Тому в формулі відстань l приймаємо від торця світловоду до об'єкту контролю. Ця відстань буде змінюватися в залежності від тиску, що діє на мембрану. Тому необхідно попередньо розрахувати статичну функцію перетворення пружної мембрани, тобто встановити залежність прогину мембрани від діючого тиску.

5. Розраховуємо діафрагму рис.8.5.

Приймаємо початкову відстань $l = 1 \text{ мм}$. Під дією тиску мембрана вигинається, і її максимальне переміщення буде в центрі, визначаємо за формулою:

$$\delta_A = \frac{3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot R^2}{16 \cdot E \cdot h^2} \cdot P,$$

де μ - коефіцієнт Пуассона ($\approx 0,28-0,3$);

E – модуль пружності матеріалу мембрани (193-200 ГПа); нержавіюча сталь AISI 304 (08X18H10), AISI 316 (03X17H14M2), AISI 321 (08X18H10T), AISI 409 (08X13), AISI 430 (08X17); Н – нікель, Х – хром, Т – титан, К – кобальт, М – молібден, В – вольфрам, Д – мідь, Г – марганець, С – кремній;

R – радіус діафрагми 5 мм;

h – товщина діафрагми 150 мкм.

Результат розрахунку $\delta_{A\max} = 0,0254 \text{ мм}$, $\delta_{A\min} = 0,009823 \text{ мм}$.

6. Оскільки поверхня діафрагми гладка, майже дзеркальна, тому вона відбиває промені від поверхні з коефіцієнтом відбиття $\rho = 0,98$. Тоді яскравість відбитого променя визначається:

$$B_{\text{поверхні}} = \rho \cdot \frac{E_{e \min}}{\pi} = 0,98 \cdot \frac{321,383}{\pi} = 100,253 \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{м}^2},$$

$$B_{\text{поверхні}} = \rho \cdot \frac{E_{e \max}}{\pi} = 0,98 \cdot \frac{331,834}{\pi} = 103,513 \frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{м}^2}.$$

7. Силу світла цієї ділянки поверхні $I_{\text{нов}}$ визначаємо:

$$I_{\text{нов. min}} = B_{\text{поверхні}} \cdot S = 100,253 \cdot 3,142 \cdot 10^{-6} = 3,15 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}},$$

$$I_{\text{нов. max}} = B_{\text{поверхні}} \cdot S = 103,513 \cdot 3,142 \cdot 10^{-6} = 3,252 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}}.$$

8. Тоді світловий потік відбитий від поверхні:

$$F_{\text{нов. min}} = I_{\text{нов}} \cdot \omega = 3,15 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot \pi = 3,95 \cdot 10^{-3} \text{ Вт},$$

$$F_{\text{нов. max}} = I_{\text{нов}} \cdot \omega = 3,252 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot \pi = 4,086 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

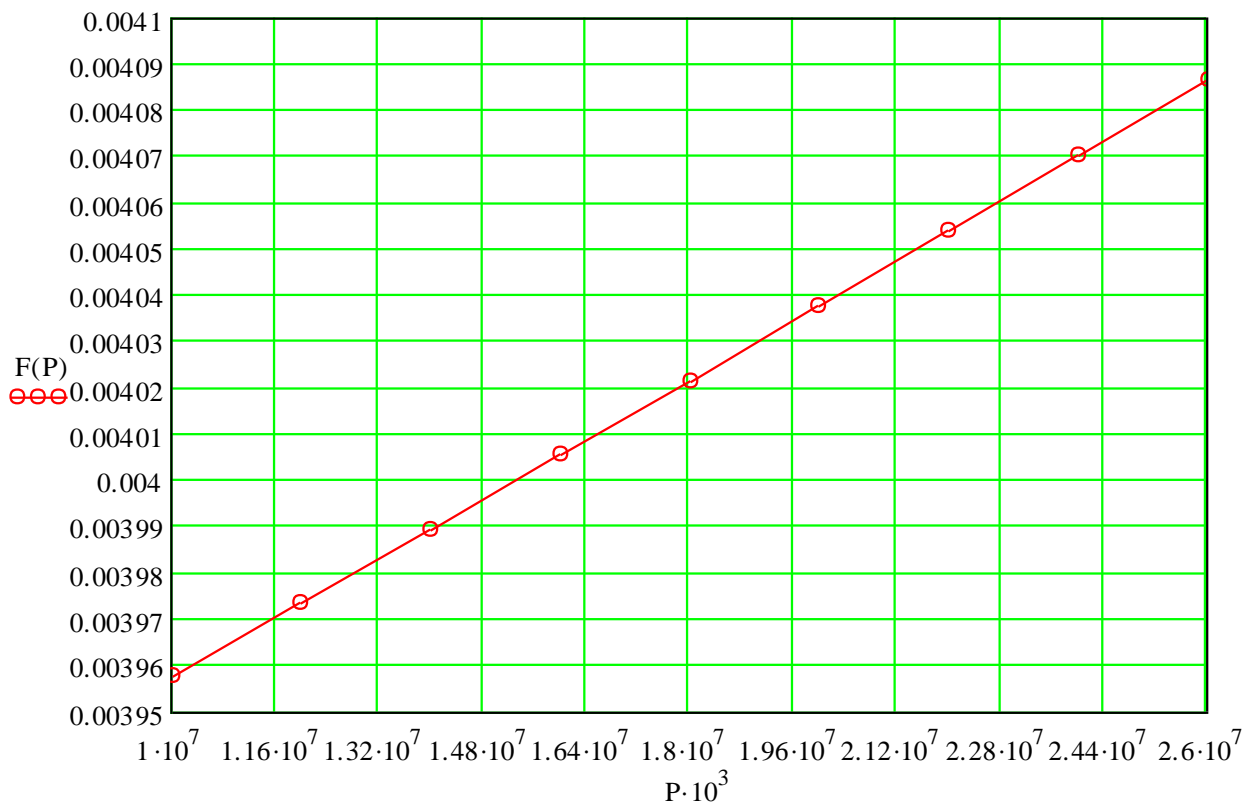


Рисунок 8.4 - Результат розрахунку відбитого потоку від поверхні діафрагми

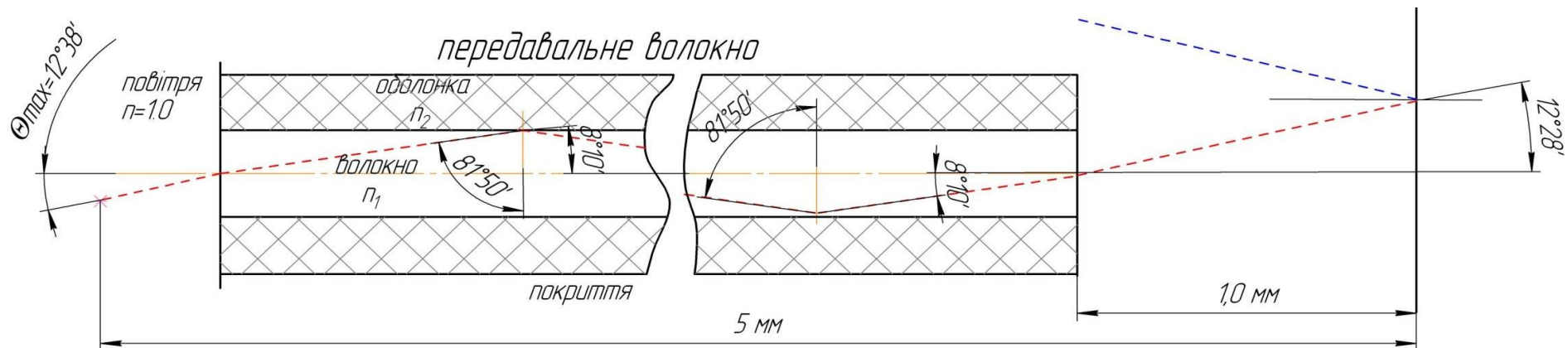


Рисунок 8.5 - Хід променів у світловоді

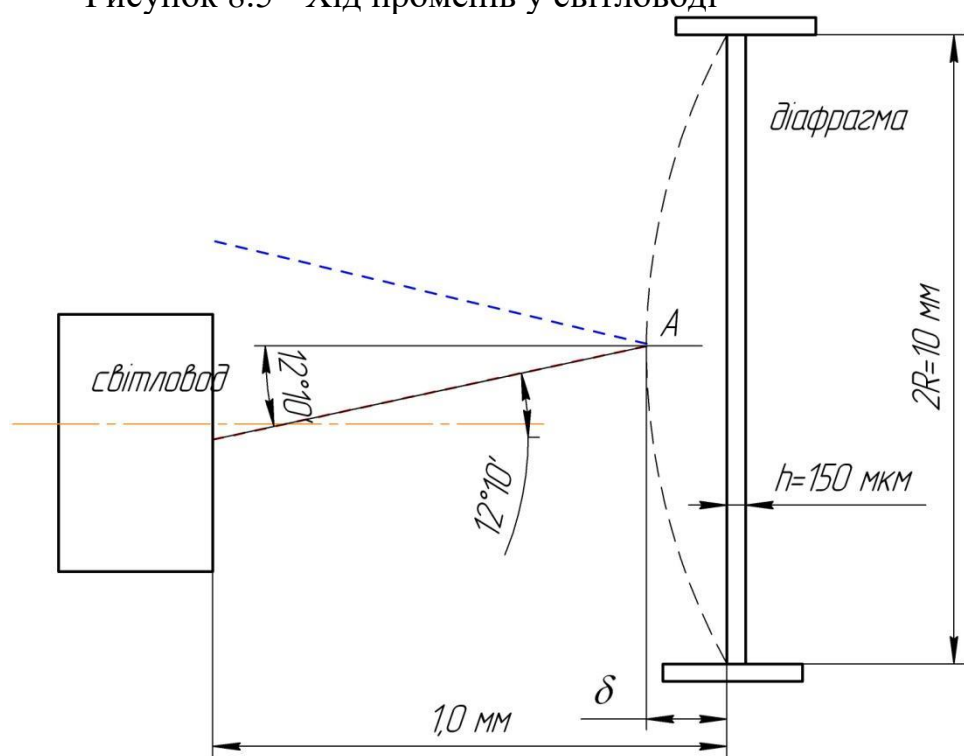


Рисунок 8.6 - Деформація діафрагми під дією вимірюваного тиску

9. Визначаємо фотострум фотодіода:

$$I_F = S_\lambda \cdot F = 6 \left(\frac{\text{мА}}{\text{лм}} \right) \cdot F_{нов.мин} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,703 = 0,01674 \text{ А} = 16,21 \text{ мА},$$

$$I_F = S_\lambda \cdot F = 6 \left(\frac{\text{мА}}{\text{лм}} \right) \cdot F_{нов.мах} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,791 = 0,01674 \text{ А} = 16,74 \text{ мА}.$$

Із довідникових даних маємо, інтегральну чутливість фотоелемента $6 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$.

Невідоме значення потоку, що падає на фотоелемент.

10. Визначаємо потік F через потужність, що освітлює фотоелемент:

$$F = F_{нов.мин} \cdot 683 \left[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] = 3,95 \cdot 10^{-3} \cdot 683 = 2,703 \text{ лм},$$

$$F = F_{нов} \cdot 683 \left[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] = 4,086 \cdot 10^{-3} \cdot 683 = 2,791 \text{ лм}.$$

11. Оскільки фотодіод підключений з зворотнім зміщенням, то струм у ланцюгу визначаємо за формулою:

$$I = I_F + I_S.$$

Темновий струм I_S визначаємо із довідникових даних 0,005 мкА.

Тоді

$$I_{мин} = I_F + I_S = 16,21 \cdot 10^{-3} + 0,005 \cdot 10^{-6} = 0,0162193 \text{ А},$$

$$I_{мах} = I_F + I_S = 16,74 \cdot 10^{-3} + 0,005 \cdot 10^{-6} = 0,0167467 \text{ А}.$$

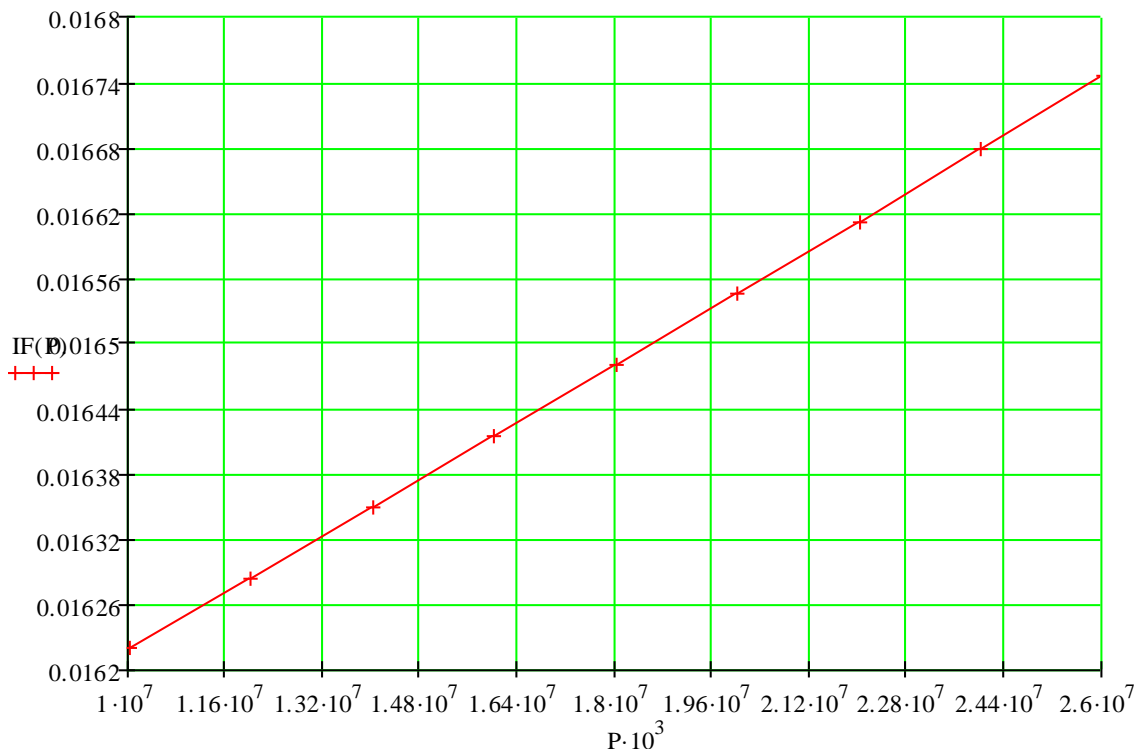
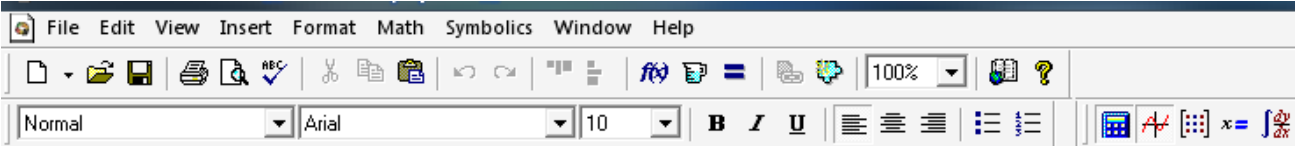


Рисунок 8.7 - Залежність фотоструму фотодіода від тиску



Завдання 1. Розрахунок датчику тиску із відбивною діафрагмою

Дано: світловолоконний жгут діаметром 2 мм, кількість волокон 100 шт, максимальний вимірюваний тиск $2.7 \cdot 10^4$ Па; товщина діафрагми 150 мкм, матеріал діафрагми нержавіюча сталь. Всі інші дані необхідні для розрахунку вибрати самостійно із конструктивних міркувань.

1. Виконуємо підбір джерела і приймача випромінювання за спектральним діапазоном, випромінюючою потужністю та спектральною чутливістю приймача.

В якості джерела випромінювання вибираємо світло діод АЛ 124 для якого:

- довжина хвилі $\lambda_{\max} = 0.85$ мкм;
- потужність випромінювання 4 мВт. $P := 4 \cdot 10^{-3}$

За спектральними характеристиками підбираємо фотодіод ФД-256 для якого:

- довжина хвилі $\lambda_{\max} = (0.75 - 0.9)$ мкм;
- темновий струм $I_T = 0,005$ мА; $I_t := 0.05 \cdot 10^{-3}$
- спектральна чутливість $S_\lambda = 6$ мА/лм. $S_\lambda := 6 \cdot 10^{-3}$

2. Сердечник оптичного волокна має коефіцієнт заломлення 1,47, а відносна різниця коефіцієнтів заломлення $\Delta=1\%$.

Розраховуємо числову апертуру оптичного волокна:

$$NA = n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta}$$

$$n_1 := 1.47 \quad \Delta := 0.01$$

$$NA := n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} \quad NA = 0.208$$

визначаємо показник заломлення n_2 :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \Rightarrow n_2 = \sqrt{n_1^2 - 0.01 \cdot 2 \cdot n_1^2}$$

$$n_2 := \sqrt{n_1^2 - 0.01 \cdot 2 \cdot n_1^2} \quad n_2 = 1.455$$

Визначаємо кута Θ , під яким світловий потік входить в світловод:

$$0 \leq \theta \leq \arcsin(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}) = \theta_{\max}$$

$$\theta := \arcsin(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \theta = 11.999$$

3.Визначаємо кут заломлення променя, що падає на границю розділу повітря світловод.

$$\varepsilon' = \arcsin\left(\frac{n \cdot \sin(\varepsilon)}{n'}\right)$$

$$n := 1 \quad \varepsilon := \arcsin\left(\frac{n \cdot \sin\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{n_1}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \varepsilon = 8.13$$

4. Розраховуємо діафрагму. Приймаємо початкову відстань $l = 1 \text{ мм}$. Під дією тиску мембрана вигинається, і її максимальне переміщення буде в центрі, визначаємо за формулою:

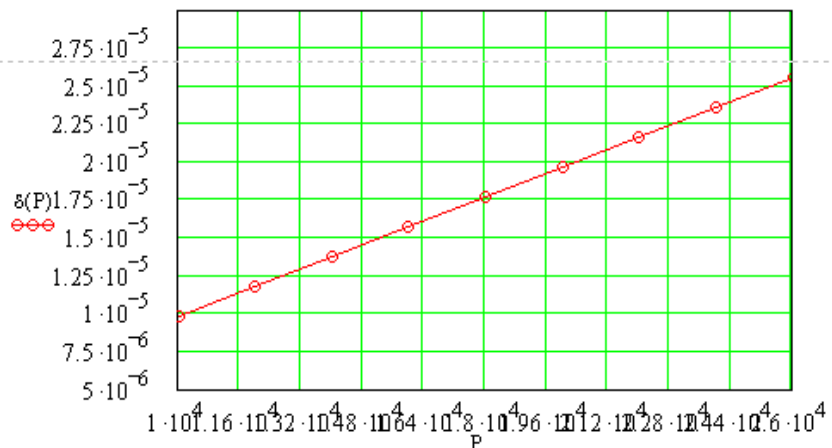
$$\delta_A = \frac{3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot R^2}{16 \cdot E \cdot h^2} \cdot P$$

$$P := 1 \cdot 10^4, 1.2 \cdot 10^4, 1.4 \cdot 10^4, 1.6 \cdot 10^4, 1.8 \cdot 10^4, 2 \cdot 10^4, 2.2 \cdot 10^4, 2.4 \cdot 10^4, 2.6 \cdot 10^4$$

$$E := 193 \cdot 10^9 \quad \mu := 0.3 \quad h := 15 \cdot 10^{-5} \quad R := 5 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta(P) := \frac{3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot R^2 \cdot P}{16 \cdot E \cdot h^2}$$

P =	$\delta(P)$ =
1 · 10 ⁴	9.823 · 10 ⁻⁶
1.2 · 10 ⁴	1.179 · 10 ⁻⁵
1.4 · 10 ⁴	1.375 · 10 ⁻⁵
1.6 · 10 ⁴	1.572 · 10 ⁻⁵
1.8 · 10 ⁴	1.768 · 10 ⁻⁵
2 · 10 ⁴	1.965 · 10 ⁻⁵
2.2 · 10 ⁴	2.161 · 10 ⁻⁵
2.4 · 10 ⁴	2.358 · 10 ⁻⁵
2.6 · 10 ⁴	2.554 · 10 ⁻⁵



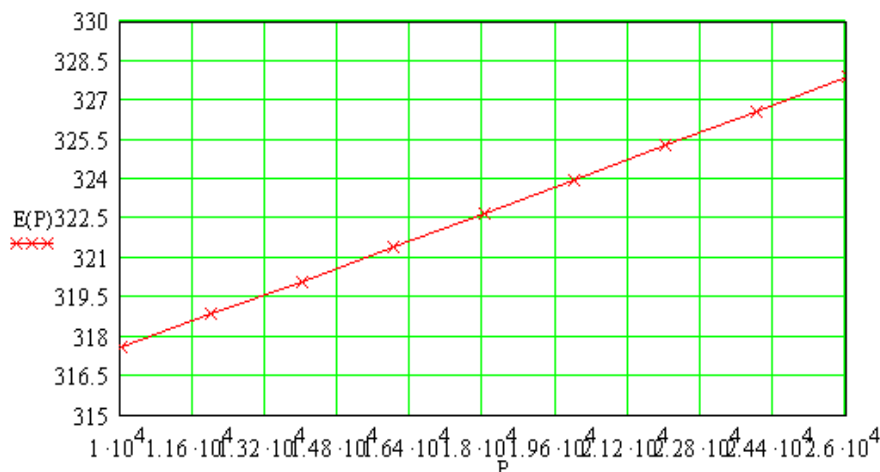
5. Визначаємо енергетичну освітленість об'єкту вимірювання:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S_2} = \frac{I_e \cdot \cos(\alpha)}{(l - \delta_{Amin})^2} = \frac{F \cdot \cos(\alpha)}{(l - \delta_{Amin})^2 \cdot \omega}$$

$$I := 1 \cdot 10^{-3} \quad I_e := \frac{F}{4 \cdot \pi} \quad I_e := 3.183 \cdot 10^{-4}$$

$$E(P) := I_e \cdot \frac{\cos\left(\theta - \frac{\pi}{180}\right)}{(l - \delta(P))^2}$$

E(P) =
317.554
318.818
320.089
321.368
322.655
323.949
325.252
326.562
327.88



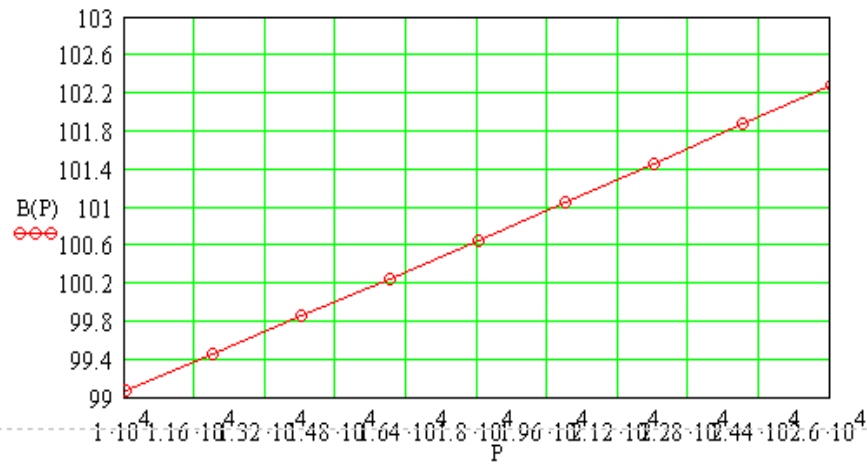
6. Оскільки поверхня діафрагми гладка, майже дзеркальна, тому вона відбиває промені від поверхні з коефіцієнтом відбиття $\rho = 0,98$. Тоді яскравість відбитого променя визначається:

$$B_{поверхні} = \rho \cdot \frac{E_e}{\pi}$$

$$\rho = 0.98 \quad B(P) := \rho \cdot \frac{E(P)}{\pi}$$

B(P) =

99.059
99.453
99.85
100.249
100.65
101.054
101.46
101.869
102.28



7. Силу світла цієї ділянки поверхні $I_{нов}$ визначаємо:

$$I_{нов} = B_{поверхні} \cdot S$$

$$d := 2 \cdot 10^{-3} \quad S := \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad S = 3.142 \times 10^{-6}$$

$$I_{пов}(P) := B(P) \cdot S$$

8. Тоді світловий потік відбитий від поверхні:

$$F_{нов} = I_{нов} \cdot \Omega$$

$$F(P) := I_{пов}(P) \cdot 4 \cdot \pi$$

9. Визначаємо потік F через потужність, що освітлює фотоелемент:

$$F = F_{нов} \cdot 683 \left[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right]$$

$$F1(P) := F(P) \cdot 683$$

10. Визначаємо фотострум фотодіода:

$$I_F = S_\lambda \cdot F$$

$$IF(P) := F1(P) \cdot S_\lambda$$

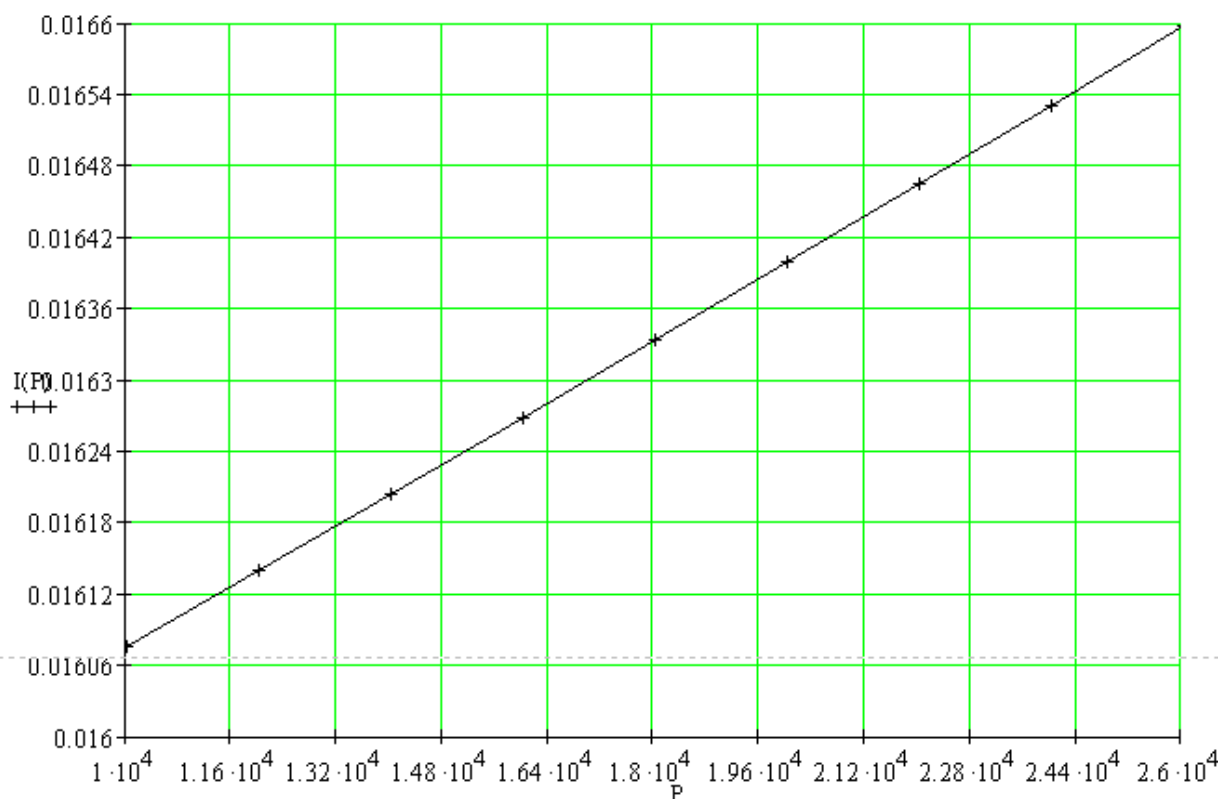
11. Оскільки фотодіод підключений з зворотнім зміщенням, то струм у ланцюгу визначаємо за формулою:

$$I = I_F + I_S$$

$$I(P) := IF(P) + I_t$$



P =	Ipov(P) =	F(P) =	F1(P) =	IF(P) =	I(P) =
1 · 10 ⁴	3.112 · 10 ⁻⁴	3.91069 · 10 ⁻³	2.671	0.016026	0.016076
1.2 · 10 ⁴	3.124 · 10 ⁻⁴	3.92625 · 10 ⁻³	2.682	0.0160898	0.0161398
1.4 · 10 ⁴	3.137 · 10 ⁻⁴	3.94191 · 10 ⁻³	2.692	0.016154	0.016204
1.6 · 10 ⁴	3.149 · 10 ⁻⁴	3.95766 · 10 ⁻³	2.703	0.0162185	0.0162685
1.8 · 10 ⁴	3.162 · 10 ⁻⁴	3.97351 · 10 ⁻³	2.714	0.0162834	0.0163334
2 · 10 ⁴	3.175 · 10 ⁻⁴	3.98945 · 10 ⁻³	2.725	0.0163488	0.0163988
2.2 · 10 ⁴	3.187 · 10 ⁻⁴	4.00549 · 10 ⁻³	2.736	0.0164145	0.0164645
2.4 · 10 ⁴	3.2 · 10 ⁻⁴	4.02162 · 10 ⁻³	2.747	0.0164806	0.0165306
2.6 · 10 ⁴	3.213 · 10 ⁻⁴	4.03786 · 10 ⁻³	2.758	0.0165471	0.0165971



Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Ендоскопія. Визначення, область використання, способи ендоскопії, класифікація ендоскопів.
2. Види ендоскопічної діагностики.
3. Конструкція та устрій гнучкого ендоскопа.
4. Схема передачі світла та зображення в ендоскопі.
5. Застосування одномодових та багатомодових волоконно-оптичних датчиків в медицині.

6. Схема датчика з оптичним перетворювачем. Вимоги до приймачів та джерел оптичного випромінювання.

7. Схема датчика з оптичним зондом. Вимоги до приймачів та джерел оптичного випромінювання.

8. Використання енергетичних та світлотехнічних світлових величин.

Література

1. Keiser, Gerd, and Gerd Keiser. Fiber optic communication networks. Springer Singapore, 2021.

2. Мохунь І.І., Вікторовська Ю.Ю., Галушко Ю.К. Оптичні технології в інформаційній техніці. – Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2021. – 301 с.

3. Сучасні оптичні технології та системи. Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 56 с.

4. Оптоелектронні інформаційні системи: Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка» / В.М. Коваль; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,64 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 165 с.

5. Волоконно-оптичні лінії зв'язку: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / Л. М. Карпуков, О. В. Щекотихін, В.О. Воскобойник – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 153с.

6. Григоренко О. Г. Волоконно-оптичні інфраструктури електронних комунікацій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей» спец. 172 Електронні комунікації та радіотехніка / О. Г. Григоренко, Г. Д. Созонник, О. О. Трубін ; КПІ ім. Ігоря Сікорського.– 1-е вид.– Електрон. текст. дані (1 файл). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.– 138 с.

7. Волоконно-оптичні датчики для автоматизованих інформаційних та інтелектуальних систем [Електронний ресурс]: підручник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології», спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і технології»/ О. К. Кучеренко. «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Електронні текстові дані (1 файл: 7,93 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 113 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 9

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДВОКОМПОНЕНТНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи

1. Виконати габаритний розрахунок двокомпонентної оптичної системи.
2. Виконати розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему.
3. Виконати розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему матричним методом.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Фотоелектрична система. Основні складові частини. Вимоги до елементів.
2. Двокомпонентна оптична система. Основні параметри.
3. Габаритний розрахунок складної оптичної системи.

2. Теоретичні відомості

2.1 Габаритний розрахунок оптичної системи

Фотоелектричні системи, в яких чутлива площадка приймача розташована в площині зображення джерела, мають недолік, який полягає в тому, що при великих кутових розмірах джерела або при рухомому джерелі, що переміщується в просторі предметів в межах значного кутового поля $2 \cdot \omega$, розмір чутливої площадки приймача повинен бути більшим, що зумовлює нестабільність сигналу внаслідок зміни чутливості по площадці приймача, значні власні шуми і технологічні труднощі виготовлення крупно габаритних приймачів. Надійну роботу фотоелектричної системи забезпечує двокомпонентна система, в якій чутлива площадка приймача розміщується в площині вихідної зіниці системи, де утворюється інтегральне зображення джерела рис.9.1, 9.2. Об'єктив створює проміжкове зображення джерела в площині аналізатора, який виконує роль польової діафрагми. Конденсор, що розташований за аналізатором, проектує вихідну зіницю об'єктиву в площину чутливої площадки приймача (площина вихідної зіниці системи). Використання конденсора дозволяє зменшити необхідний розмір чутливої площадки приймача, в результаті чого зменшується вплив нерівномірної чутливості по площадці і зменшуються власні шуми приймача.

Світлоенергетичний розрахунок системи з конденсором полягає в знаходженні діаметру вхідної зіниці об'єктиву, який забезпечує надходження на приймач потоку випромінювання, необхідного для отримання заданого сигналу.

Значення апертурного кута системи в просторі предметів σ_A , який визначає діаметр $D_{\text{вх}}$ вхідної зіниці об'єктиву, визначають за формулою:

$$D \geq 2 \cdot p \cdot \operatorname{tg}(\sigma_A) \quad (9.1)$$

Габаритний розрахунок системи полягає у визначенні фокусних відстаней об'єктиву і конденсора, а також взаємного розташування об'єктиву, конденсора і приймача.

Лінійне збільшення об'єктиву β_1 (при розташуванні джерела випромінювання на кінцевій відстані від системи) знаходиться як відношення діаметру $2y'$ польової діафрагми (аналізатора) – до лінійного поля $2y$ об'єктиву в просторі предметів:

$$\beta_1 = -\frac{2y'}{2y} \quad (9.2)$$

Тоді при відомій відстані a_1 від об'єктиву до джерела випромінювання відстань a'_1 від об'єктиву до площини аналізатора і фокусну відстань об'єктиву f'_1 визначають за формулами:

$$a'_1 = \beta_1 \cdot a_1; \quad f'_1 = \frac{a_1 \cdot \beta_1}{1 - \beta_1} = \frac{a'_1}{1 - \beta_1} \quad (9.3)$$

У випадку віддаленості предмету $-a_1 \rightarrow \infty$ аналізатор розміщують в задній фокальній площині об'єктиву, задню фокусну відстань якого визначають за формулою:

$$f'_1 = \frac{y'}{\text{tg}(\omega)} \quad (9.4)$$

де ω - кутове поле об'єктиву в просторі предметів.

Лінійне збільшення конденсора β_2 визначається із умови спряження вихідної зіниці об'єктиву з вихідною зіницею системи. Лінійне збільшення в зіницях системи:

$$\beta_p = \beta_{p1} \cdot \beta_2 = \frac{D'_{1\text{вих}} \cdot D'_{2\text{вих}}}{D_{1\text{вх}} \cdot D'_{1\text{вих}}} = \frac{D'_{2\text{вих}}}{D_{1\text{вх}}} \quad (9.5)$$

де β_{p1} - лінійне збільшення в зіницях об'єктиву;

$D'_{1\text{вих}}$, $D'_{2\text{вих}}$ - діаметри вихідних зіниць об'єктиву і всієї системи відповідно.

При $\beta_{p1} = 1$

$$\beta_p = \frac{d_{np}}{D_{1\text{вх}}} \quad (9.6)$$

Відстань d між головними площинами конденсора і об'єктиву:

$$d = a'_1 + a_2$$

де a_2 - відстань між площиною аналізатора і головними площинами конденсора, вибирається по можливості малим із умови зменшення світлового діаметру конденсора D_2 .

Фокусну відстань f'_2 визначають з умови забезпечення отримання після конденсора пучка світла, що є паралельним, або пучка, що збігається: $f'_2 \leq e$.

Відстань a'_2 , характеризує положення вихідної зіниці системи (площини розміщення чутливої площадки приймача) відносно головних площин конденсора, і задню фокусну відстань f'_2 розраховують за формулами:

$$a'_2 = \beta_2 \cdot a_2; \quad f'_2 = \frac{a_2 \cdot \beta_2}{1 - \beta_2} = \frac{a'_2}{1 - \beta_2} \quad (9.7)$$

Кутове поле конденсора в просторі зображення $2\omega'_k$:

$$tg(\omega'_k) = \gamma_p \cdot tg(\omega) \quad (9.8)$$

де γ_p - кутове збільшення в зіницях системи.

Для системи, що розташована в однорідному середовищі, при $\beta_{p1} = 1$:

$$tg(\omega'_k) = \frac{tg(\omega)}{\beta_p} = \frac{tg(\omega)}{\beta_2} = \frac{tg(\omega) \cdot D_{1ex}}{d_{np}} \quad (9.9)$$

Якщо площина аналізатора знаходиться в суміщених задній фокальній площині об'єктиву і передній фокальній площині конденсора, то:

$$tg(\omega'_k) = tg(\omega) \cdot \frac{f'_1}{f'_2} \quad (9.10)$$

Діаметр конденсора D_2 за відсутності він'єтування для краю поля визначається ходом крайнього променя нахилоного пучка (який йде через нижній край вихідної зіниці об'єктиву і верхній край польової діафрагми):

$$D_2 = D_{ПД} + 2 \cdot a_2 \cdot tg(\varphi) \quad (9.11)$$

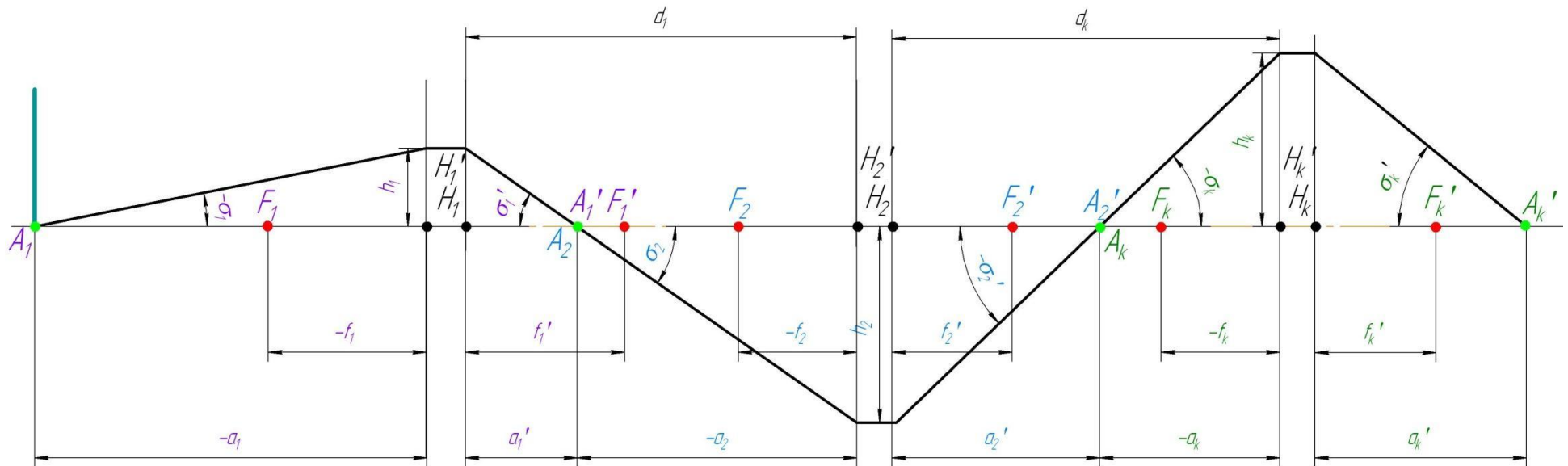
$$\text{де } tg(\varphi) = \frac{D'_{1ex} + D_{ПД}}{2 \cdot a'_1}.$$

2.2 Розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему

Нехай складна система складається із ряду простих систем, заданих положенням фокусу та головних площин, взаємне розташування яких задано відстанями $d_1, d_2, \dots, d_m, \dots, d_{k-1}$, де d_m - відстань між задньою головною площиною попереднього m -го компонента та передньої головної площини наступного.

Із точки предмету A_1 , що знаходиться на відстані a_1 від передньої головної площини першої системи, проводимо довільний промінь під кутом σ_1 .

Заломлюючись всередині системи, цей промінь пройде через точки A_1' (A_2); A_2' (A_k); A_k .



I-ший оптичний елемент	II-гий оптичний елемент	k-тий оптичний елемент
Дано: $-a_1, \sigma_1, -f_1 = f'_1$	Дано: $-f_2 = f'_2, d_1$	Дано: $-f_k = f'_k, d_k$
$a'_1 = \frac{a_1 \cdot f'_1}{a_1 - f_1}$ $tg(\sigma_1) = \left(\frac{h_1}{a_1} \right)$ $\sigma'_1 = \sigma_2 = arctg\left(-\frac{f_1}{f'_1} \cdot tg(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f'_1} \right)\right)$	$a_2 = a'_1 - d_1, \quad a'_2 = \frac{a_2 \cdot f'_2}{a_2 - f_2}$ $h_2 = h_1 - d_1 \cdot tg(\sigma_2)$ $\sigma_2 = arctg\left(-\frac{f_1}{f'_1} \cdot tg(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f'_1} \right)\right)$ $\sigma'_2 = \sigma_k = arctg\left(-\frac{f_2}{f'_2} \cdot tg(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f'_2} \right)\right)$	$a_k = a'_2 - d_k, \quad a'_k = \frac{a_k \cdot f'_k}{a_k - f_k}$ $h_k = h_2 - d_k \cdot tg(\sigma_k)$ $\sigma_k = arctg\left(-\frac{f_2}{f'_2} \cdot tg(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f'_2} \right)\right)$ $\sigma'_k = arctg\left(-\frac{f_k}{f'_k} \cdot tg(\sigma_k) + \left(\frac{h_k}{f'_k} \right)\right)$

Лінійне збільшення складної системи визначається за формулою: $\beta = -\frac{f}{f'} \prod_{m=1}^{m=k} \left(\frac{a'}{a} \right)_m$

2.3 Розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему матричним методом

Загальна матриця перетворення

$$M_{\Sigma} = \mathfrak{T}_2 \cdot M_{2\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_1 \cdot M_{1\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a'_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & f'_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & f'_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3. Виконання завдання

Завдання 3.1 Габаритний розрахунок оптичної системи

Розрахувати фотоелектричну систему з приймачем випромінювання, розташованим в площині вихідної зіниці.

*Примітка. Варіанти вихідних даних (тип джерела та приймача випромінювання підібрати самостійно).

Приклад 9.1

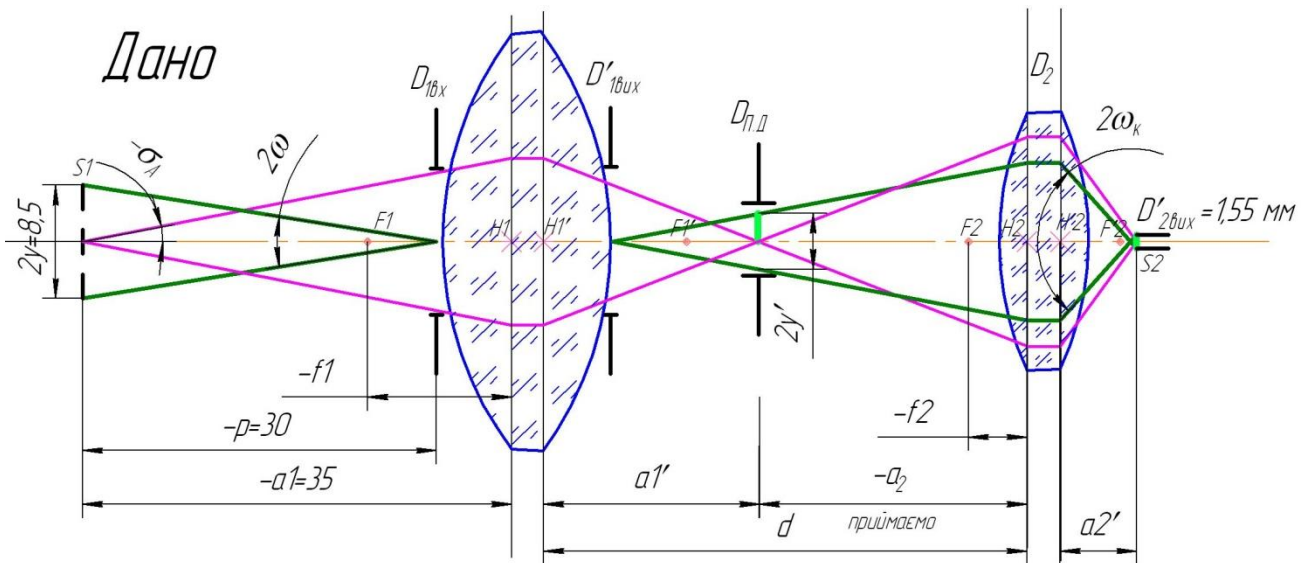
Розрахувати фотоелектричну систему з приймачем випромінювання, розташованим в площині вихідної зіниці.

Дано джерело світла:

- Діаметр випромінюючої площадки 8,5 мм;
- Потік випромінювання 750 лм.

Дано приймач випромінювання:

- Діаметр приймальної площадки 1,55 мм;
- інтегральна спектральна чутливість $S_i = 3.3 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$,
- мінімально допустимий струм фотоприймача $i_{\min} \geq 0.017 \text{ мкА}$



Рішення

1. Визначаємо значення апертурного кута системи в просторі предметів σ_A , який визначає діаметр $D_{1\text{вх}}$ вхідної зіниці об'єктиву:

$$\sin^2(\sigma_A) \geq \frac{i_{\min}}{\tau \cdot \pi \cdot I_e \cdot S_{\text{инт}}} \Rightarrow \sigma_A = \arcsin\left(\sqrt{\frac{i_{\min}}{\tau \cdot \pi \cdot I_e \cdot S_{\text{инт}}}}\right) \geq 0,326^\circ$$

$$\text{приймаємо } \sigma_A = 3,26^\circ$$

2. Визначаємо діаметр вхідної зіниці за формулою:

$$D_{1\text{вх}} \geq 2 \cdot p \cdot \text{tg}(\sigma_A) = 2 \cdot 30 \cdot \text{tg}(3,26) \geq 3,41 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,0 \text{ мм}$$

3. Виконуємо габаритний розрахунок. Габаритний розрахунок системи складається в визначенні фокусних відстаней об'єктиву і конденсора, а також взаємного розташування об'єктиву, конденсора і приймача.

Приймаємо:

- розташування джерела випромінювання на кінцевій відстані від системи – $a_1 = 35 \text{ мм}$
- Лінійне збільшення об'єктиву $\beta_1 = -0,4$ (*приймається попередньо, і можна змінювати в залежності від необхідного загального лінійного коефіцієнту збільшення $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$).

Визначаємо діаметр польової діафрагми із формули:

$$\beta_1 = -\frac{2y'}{2y} \Rightarrow 2y' = \beta_1 \cdot 2y = 3,4 \text{ мм}$$

$$\text{приймаємо } D_{\text{п.д.}} = 4,0 \text{ мм}$$

4. Тоді при відомій відстані – $a_1 = 35 \text{ мм}$ від об'єктиву до джерела випромінювання відстань a'_1 від об'єктиву до площини аналізатора і фокусу відстань об'єктиву f'_1 визначають за формулами:

$$a'_1 = \beta_1 \cdot a_1 = -0,4 \cdot (-35) = 14 \text{ мм}; \quad f'_1 = \frac{a'_1}{1 - \beta_1} = \frac{14}{1 - (-0,4)} = 10 \text{ мм}$$

5. Лінійне збільшення конденсора β_2 визначається із умови спряження вихідної зіниці об'єктиву з вихідною зіницею системи. Лінійне збільшення в зіницях системи:

$$\beta_p = \beta_{p1} \cdot \beta_2 = \frac{D'_{1\text{вих}} \cdot D'_{2\text{вих}}}{D_{1\text{вх}} \cdot D'_{1\text{вих}}} = \frac{D'_{2\text{вих}}}{D_{1\text{вх}}}$$

де β_{p1} - лінійне збільшення в зіницях об'єктиву;

$D'_{1\text{вих}}$, $D'_{2\text{вих}}$ - діаметри вихідних зіниць об'єктиву і всієї системи відповідно.

При $\beta_{p1} = 1$

$$\beta_p = \beta_2 = \frac{d_{np}}{D_{1\text{вх}}} = \frac{1,55}{4,0} = -0,3875 \quad \beta_p = \beta_2 = \frac{d_{np}}{D_{1\text{вх}}}$$

6. Відстань d між головними площинами конденсора і об'єктиву:

$$d = a'_1 + a_2 = 14 + 15 = 29 \text{ мм}$$

де a_2 - відстань між площиною аналізатора і головним площинами конденсора, вибирається по можливості малим із умови зменшення світлового діаметру конденсора D_2 .

Фокусну відстань f'_2 визначають із умови, забезпечення отримання паралельного або східного пучка світла після конденсора: $f'_2 \leq a_2$.

7. Відстань a'_2 , характеризує положення вихідної зіниці системи (площини розміщення чутливої площадки приймача) відносно головних площин конденсора, і задню фокусну відстань f'_2 розраховують за формулами:

$$a'_2 = \beta_2 \cdot a_2 = -0,3875 \cdot (-15) = 5,813 \text{ мм};$$

$$f'_2 = \frac{a'_2}{1 - \beta_2} = \frac{5,816}{1 - (-0,3875)} = 4,189 \text{ мм}$$

8. Діаметр конденсора D_2 для краю поля визначається ходом крайнього променя нахиленого пучка, що проходить через нижній край вихідної зіниці об'єктиву і верхній край польової діафрагми:

$$D_2 = D_{\text{ПД}} + 2 \cdot a_2 \cdot \text{tg}(\varphi) = D_{\text{ПД}} + 2 \cdot a_2 \cdot \frac{D'_{1\text{вих}} + D_{\text{ПД}}}{2 \cdot a'_1} = 3,5 + 2 \cdot 20 \left(\frac{4,0 + 4,0}{2 \cdot 14} \right) = 13 \text{ мм}$$

$$\text{де } \text{tg}(\varphi) = \frac{D'_{1\text{вих}} + D_{\text{ПД}}}{2 \cdot a'_1}.$$

9. Кутове поле конденсора в просторі зображення $2\omega'_k$:

$$\text{tg}(\omega'_k) = \gamma_p \cdot \text{tg}(\omega)$$

де γ_p - кутове збільшення в зіницях системи.

Для системи, що розташована в однорідному середовищі, при $\beta_{p1} = 1$:

$$\text{tg}(\omega'_k) = \frac{\text{tg}(\omega)}{\beta_p} = \frac{\text{tg}(\omega)}{\beta_2} = \frac{\text{tg}(\omega) \cdot D_{1\text{вх}}}{d_{\text{np}}} = \frac{\text{tg}(8,063^\circ) \cdot 4,0}{1,55} = 0,366$$

$$\omega'_k = 20,08^\circ$$

Всі розраховані параметри оптичної системи зображено на рис.9.3.

Оптичний розрахунок

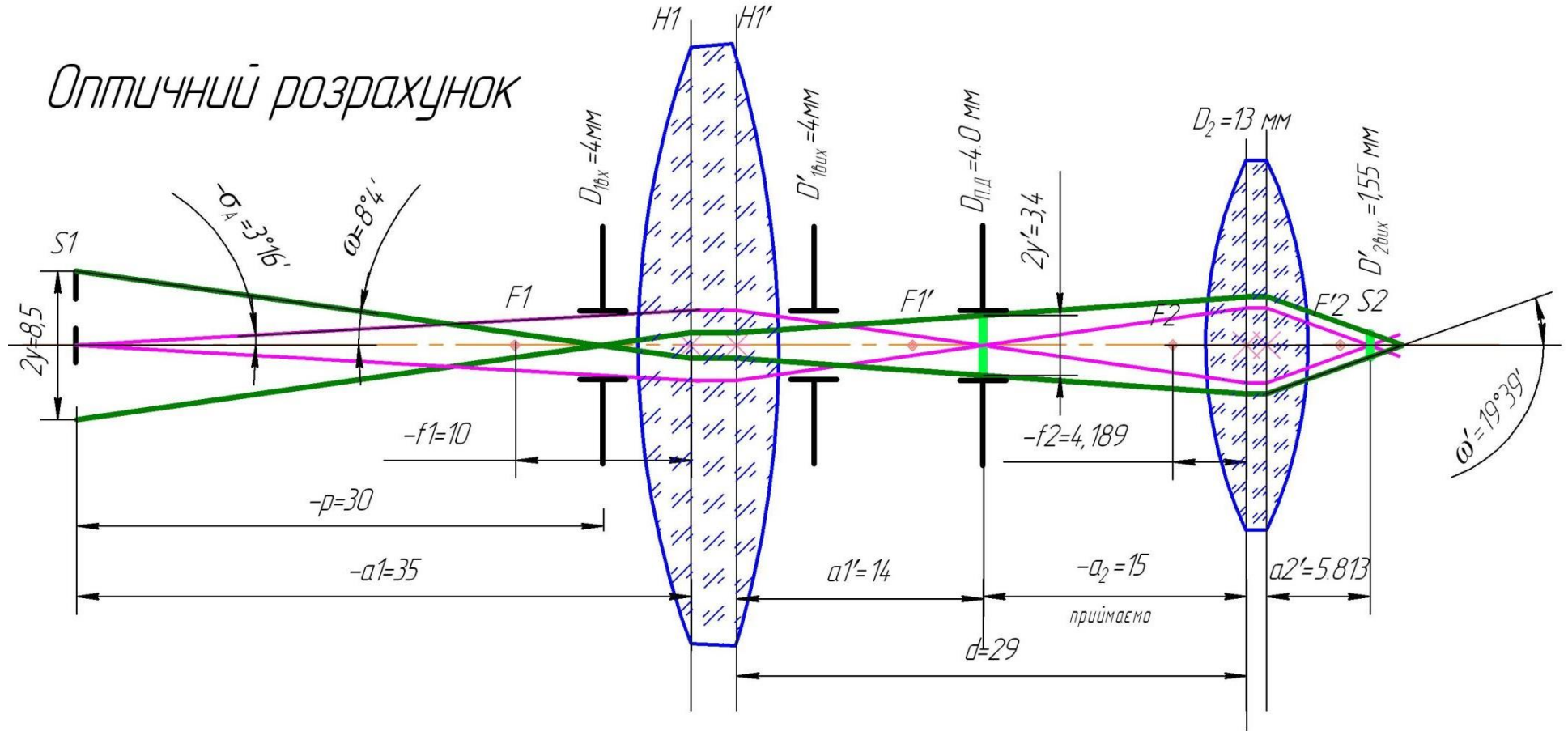
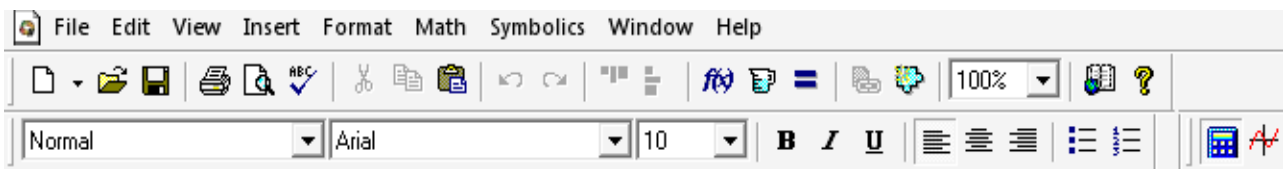


Рисунок 9.3 - Двокомпонентна фотоелектрична оптична система з розрахованими параметрами



Розрахунок фотоелектричної системи з приймачем випромінювання, розташованим в площині вихідного зрачка

Дано джерело світла:

- діаметр випромінюючої площадки

$$D_{\text{джерело}} := 8.5 \cdot 10^{-3}$$

- потік випромінювання

$$F := 750$$

Дано приймач випромінювання:

- діаметр приймальної площадки

$$d_{\text{пр}} := 1.55 \cdot 10^{-3}$$

- інтегральна спектральна чутливість

$$S_i := 3.3 \cdot 10^{-3}$$

- мінімально допустимий струм фотоприймача

$$I_{\text{мін}} := 0.018 \cdot 10^{-3}$$

1. Визначаємо значення апертурного кута системи в просторі предметів σ_A , який визначає діаметр $D_{1\text{вх}}$ вхідного зрачка об'єктиву

$$\sin^2(\sigma_A) \geq \frac{I_{\text{мін}}}{\tau \cdot \pi \cdot I_e \cdot S_{\text{ізм}}} \Rightarrow \sigma_A = \arcsin\left(\sqrt{\frac{I_{\text{мін}}}{\tau \cdot \pi \cdot I_e \cdot S_{\text{ізм}}}}\right)$$

$$\omega := 4 \cdot \pi \quad \tau := 0.9 \quad \sigma_A := \left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{I_{\text{мін}}}{\tau \cdot \pi \cdot \frac{F \cdot S_i}{\omega}}}}\right) \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \sigma_A = 0.326$$

приймаємо $\sigma_A := 3.26$

2. Визначаємо діаметр вхідного зрачка за формулою

$$D_{1\text{вх}} \geq 2 \cdot p \cdot \operatorname{tg}(\sigma_A)$$

$$p := 30 \cdot 10^{-3} \quad D_{1\text{в}} := 2 \cdot p \cdot \tan\left(\sigma_A \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad D_{1\text{в}} = 3.418 \times 10^{-3} \quad D_{1\text{в}} := 4 \cdot 10^{-3}$$

3. Приймаємо розташування джерела випромінювання на відстані

$$a_1 := -35 \cdot 10^{-3}$$

Лінійне збільшення об'єктиву

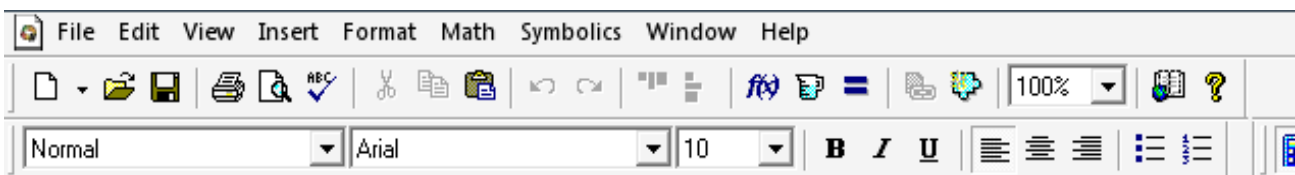
$$\beta_1 := -0.4$$

Визначаємо діаметр польової діафрагми

$$\beta_1 = -\frac{2y'}{2y} \Rightarrow 2y' = \beta_1 \cdot 2y$$

$$D_{\text{пд}} := \beta_1 \cdot (-D_{\text{джерело}})$$

$$D_{\text{пд}} = 3.4 \times 10^{-3}$$



$$\beta_1 = -\frac{2y'}{2y} \Rightarrow 2y' = \beta_1 \cdot 2y$$

$$Dpd := \beta_1 \cdot (-Ddgerelo)$$

$$Dpd = 3.4 \times 10^{-3}$$

приймаємо

$$Dpd := 4 \cdot 10^{-3}$$

4. Відстань від об'єктиву до площини аналізатора визначається

$$a_1' = \beta_1 \cdot a_1$$

$$aa1 := \beta_1 \cdot a1$$

$$aa1 = 0.014$$

Фокусна відстань

$$f_1' = \frac{a_1'}{1 - \beta_1}$$

$$ff1 := \frac{aa1}{1 - \beta_1}$$

$$ff1 = 0.01$$

5. Лінійне збільшення конденсора та в зрачках системи

$$\beta_p = \beta_2 = \frac{d_{np}}{D_{lex}}$$

$$\beta_2 := \frac{-dpr}{D1v}$$

$$\beta_2 = -0.3875$$

6. Відстань a_2 між головними площинами конденсора і об'єктиву

$$d = a_1' + a_2$$

$$a_2 := -15 \cdot 10^{-3}$$

$$d := (aa1 - a_2)$$

$$d = 0.029$$

7. Визначаємо відстань, що характеризує положення вихідного зрачка системи відносно головних площин конденсора

$$a_2' = \beta_2 \cdot a_2$$

$$aa2 := \beta_2 \cdot (a_2)$$

$$aa2 = 5.813 \times 10^{-3}$$

Тоді задня фокусна відстань

$$f_2' = \frac{a_2'}{1 - \beta_2}$$

$$ff2 := \frac{aa2}{1 - \beta_2}$$

$$ff2 = 4.18919 \times 10^{-3}$$

8. Визначаємо діаметр конденсора D_2

$$D_2 = D_{пд} + 2 \cdot a_2 \cdot \text{tg}(\varphi) = D_{пд} + 2 \cdot |a_2| \cdot \frac{D'_{lex} + D_{пд}}{2 \cdot a_1'}$$

$$D_2 := Dpd + 2 \cdot |a_2| \cdot \frac{D1v + Dpd}{2 \cdot aa1}$$

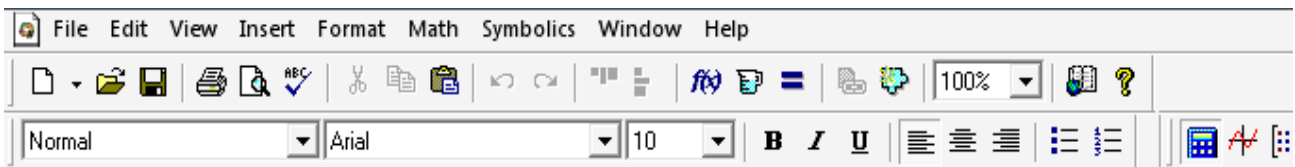
$$D_2 = 0.013$$

9. Кутове поле конденсора в просторі зображення

$$\text{tg}(\omega'_k) = \frac{\text{tg}(\omega)}{\beta_p} = \frac{\text{tg}(\omega)}{\beta_2} = \frac{\text{tg}(\omega) \cdot D_{lex}}{d_{np}}$$

$$\beta := \beta_2 \cdot \beta_1$$

$$\beta = 0.155$$



9. Кутове поле конденсора в просторі зображення

$$tg(\omega'_k) = \frac{tg(\omega)}{\beta_p} = \frac{tg(\omega)}{\beta_2} = \frac{tg(\omega) \cdot D_{dgerelo}}{d_{np}}$$

$$\beta := \beta_2 \cdot \beta_1 \quad \beta = 0.155$$

$$\omega := \text{atan}\left(\frac{\frac{D_{dgerelo}}{2}}{p}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \omega = 8.063$$

$$\omega_{ok} := \left[\left[\text{atan}\left(\frac{\tan\left(\omega \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot D_{dgerelo}}{d_{pr}}\right) \right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \omega_{ok} = 20.082$$

$$\omega_{ok} := \left[\left[\left[\text{atan}\left(\frac{\tan\left(\omega \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\beta_2}\right) \right] \right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \omega_{ok} = -20.082$$

10. Розмір зфокусованого випромінювання на приймач

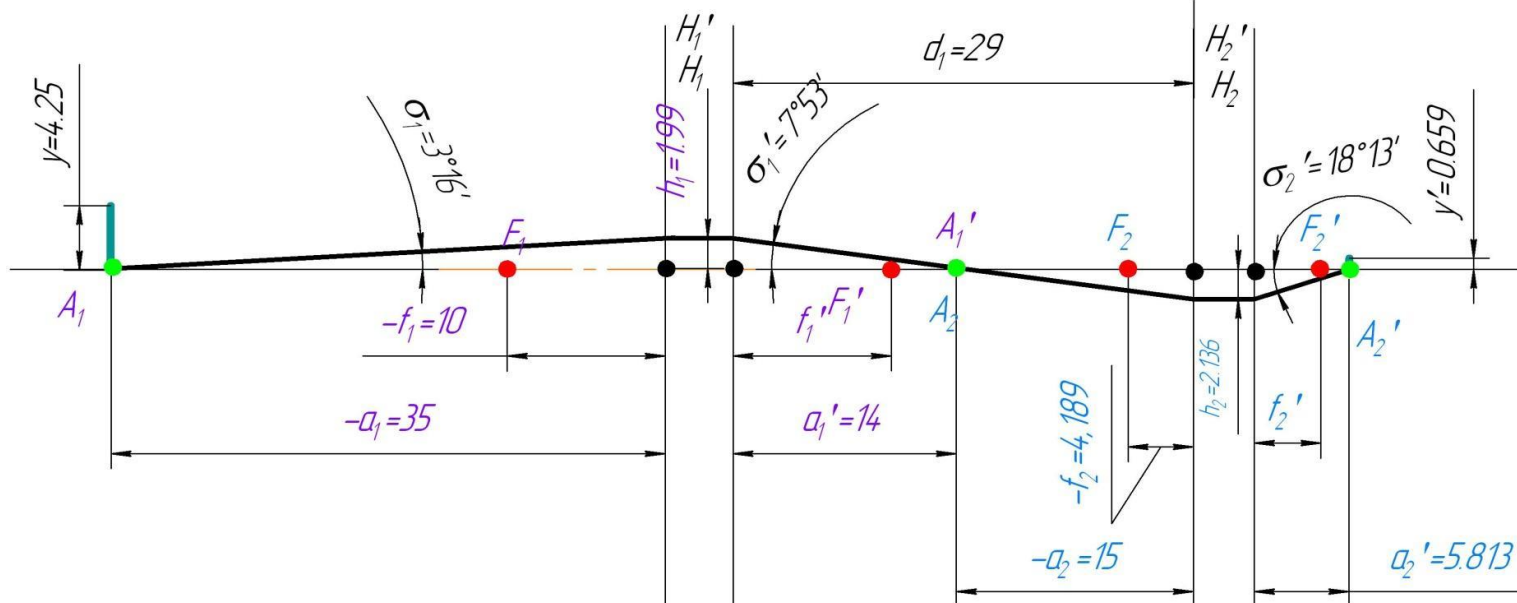
$$df := \beta \cdot D_{dgerelo}$$

$$df = 1.318 \times 10^{-3}$$

Як видно із розрахунку розмір зфокусованого випромінювання має дещо менші розміри ніж сам приймач. Тобто весь потік буде сприйматися приймачем - без втрат



Завдання 2. Розрахунок ходу променів крізь двоконцентну оптичну систему



I-ший оптичний елемент	II-гий оптичний елемент
Дано: $-a_1 = 35 \text{ мм}, -\sigma_1 = 3,26^\circ, -f_1 = f_1' = 10 \text{ мм}$	Дано: $-f_2 = f_2' = 4,189 \text{ мм}, d_1 = 29 \text{ мм}$
$\sigma_1 = \arctg\left(\frac{h_1}{a_1}\right) \Rightarrow h_1 = a_1 \cdot \text{tg}(\sigma_1) = 1,99 \text{ мм}$ $a_1' = \frac{a_1 \cdot f_1'}{a_1 - f_1} = 14 \text{ мм}$ $\sigma_1' = \sigma_2 = \arctg\left(-\frac{f_1}{f_1'} \cdot \text{tg}(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f_1'}\right)\right) = 8,104^\circ$	$a_2 = a_1' - d_1 = -15 \text{ мм}, \quad a_2' = \frac{a_2 \cdot f_2'}{a_2 - f_2} = 5,813 \text{ мм}, \quad h_2 = h_1 - d_1 \cdot \text{tg}(\sigma_2) = -2,136 \text{ мм}$ $\sigma_2 = \arctg\left(-\frac{f_1}{f_1'} \cdot \text{tg}(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f_1'}\right)\right) = 8,104^\circ$ $\sigma_2' = \sigma_k = \arctg\left(-\frac{f_2}{f_2'} \cdot \text{tg}(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f_2'}\right)\right) = -20,178^\circ$

Визначаємо лінійне збільшення складної системи: $\beta = -\frac{f}{f'} \prod_{m=1}^{m=k} \left(\frac{a'}{a}\right)_m = 0.155$

Визначаємо розмір зображення $2y' = \beta \cdot 2y = 0,155 \cdot 8,5 = 1,317 \text{ мм}$



Розрахунок ходу променів крізь двохкомпонентну оптичну систему

Перший оптичний елемент

Дано :

*беремо вихідні дані із попереднього розрахунку оптичної системи

- відстань a_1
- передній апертурний кут
- фокусна відстань

$$\begin{aligned}
 a_1 &:= -35 \cdot 10^{-3} \\
 \sigma_1 &:= -3.26 \\
 f_1 &:= -10 \cdot 10^{-3} & f_{f1} &:= 10 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

1. Визначаємо висоту падіння променя на перший оптичний елемент

$$\sigma_1 = \arctg\left(\frac{h_1}{a_1}\right) \Rightarrow h_1 = a_1 \cdot \operatorname{tg}(\sigma_1) \qquad h_1 := a_1 \cdot \tan\left(\sigma_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \qquad h_1 = 1.994 \times 10^{-3}$$

2. Відстань від об'єктиву до площини аналізатора де буде проміжкове зображення визначається

$$a_1' = \frac{a_1 \cdot f_1'}{a_1 - f_1} \qquad a_{a1} := \frac{a_1 \cdot f_{f1}}{a_1 - f_1} \qquad a_{a1} = 0.014$$

3. Визначаємо кут падіння променя на другий оптичний компонент

$$\begin{aligned}
 \sigma_1' = \sigma_2 &= \arctg\left(-\frac{f_1}{f_1'} \cdot \operatorname{tg}(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f_1'}\right)\right) \\
 \sigma_1 &:= \left[\operatorname{atan}\left[\left(\frac{-f_1}{f_{f1}}\right) \cdot \tan\left(\sigma_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \left(\frac{h_1}{f_{f1}}\right)\right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \qquad \sigma_1 = 8.104
 \end{aligned}$$

Другий оптичний елемент

Дано :

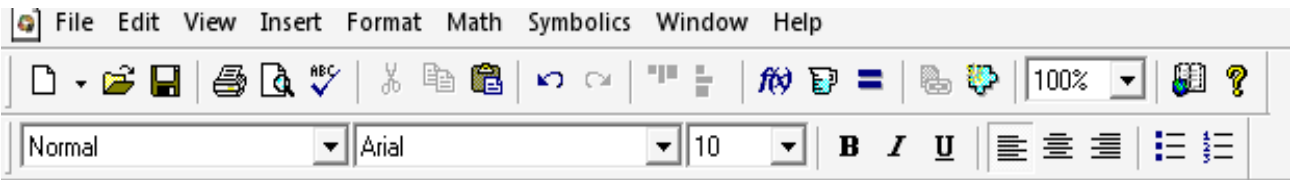
*беремо вихідні дані із попереднього розрахунку оптичної системи

- відстань d_1 (в даному випадку це відстань a_2 із попереднього розрахунку оптичної системи)

$$d := 29 \cdot 10^{-3}$$

- фокусна відстань

$$f_2 := -4.189 \cdot 10^{-3} \qquad f_{f2} := 4.189 \cdot 10^{-3}$$



4. Визначаємо відстань розташування попереднього зображення до другого оптичного компоненту

$$a_2 = a'_1 - d_1 \quad a2 := a1 - d \quad a2 = -0.015$$

5. Визначаємо відстань після проходження другого оптичного компоненту

$$a'_2 = \frac{a_2 \cdot f'_2}{a_2 - f_2} \quad aa2 := \frac{a2 \cdot ff2}{a2 - f2} \quad aa2 = 5.812 \times 10^{-3}$$

6. Визначаємо висоту падіння променя на другий оптичний компонент

$$h_2 = h_1 - d_1 \cdot \operatorname{tg}(\sigma_2) \quad \sigma2 := \sigma1 \quad \sigma2 = 8.104$$

$$h2 := h1 - d \cdot \tan\left(\sigma2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad h2 = -2.136 \times 10^{-3}$$

8. Визначаємо кут виходу променя із другого оптичного компоненту

$$\sigma'_2 = \sigma_k = \operatorname{arctg}\left(-\frac{f_2}{f'_2} \cdot \operatorname{tg}(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f'_2}\right)\right)$$

$$\sigma\sigma2 := \left[\operatorname{atan}\left[\left(\frac{-f2}{ff2}\right) \cdot \tan\left(\sigma2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \left(\frac{h2}{ff2}\right)\right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \sigma\sigma2 = -20.178$$

9. Визначаємо лінійне збільшення двохкомпонентної оптичної системи

$$\beta = -\frac{f}{f'} \prod_{m=1}^{m=k} \left(\frac{a'}{a}\right)_m \quad \beta := \left(\frac{aa1}{a1}\right) \cdot \left(\frac{aa2}{a2}\right) \quad \beta = 0.155$$

Тоді розмір зображення

$$y' = \beta \cdot y \quad Ddgerelo := 8.5 \cdot 10^{-3}$$

$$df := \beta \cdot Ddgerelo \quad df = 1.317 \times 10^{-3}$$



Розрахунок ходу променів крізь двохкомпонентну оптичну систему

Перший оптичний елемент

Дано :

*беремо вихідні дані із попереднього розрахунку оптичної системи

- відстань a_1
- передній апертурний кут
- фокусна відстань

$$a_1 := -35 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_1 := -3.26$$

$$f_1 := -10 \cdot 10^{-3} \quad f_{f1} := 10 \cdot 10^{-3}$$

1. Визначаємо висоту падіння променя на перший оптичний елемент

$$\sigma_1 = \arctg\left(\frac{h_1}{a_1}\right) \Rightarrow h_1 = a_1 \cdot \operatorname{tg}(\sigma_1) \quad h_1 := a_1 \cdot \tan\left(\sigma_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad h_1 = 1.994 \times 10^{-3}$$

2. Відстань від об'єктиву до площини аналізатора де буде проміжкове зображення визначається

$$a'_1 = \frac{a_1 \cdot f'_1}{a_1 - f_1} \quad a_{a1} := \frac{a_1 \cdot f_{f1}}{a_1 - f_1} \quad a_{a1} = 0.014$$

3. Визначаємо кут падіння променя на другий оптичний компонент

$$\sigma'_1 = \sigma_2 = \arctg\left(-\frac{f_1}{f'_1} \cdot \operatorname{tg}(\sigma_1) + \left(\frac{h_1}{f'_1}\right)\right)$$

$$\sigma_{\sigma 1} := \left[\operatorname{atan}\left[\left(\frac{-f_1}{f_{f1}}\right) \cdot \tan\left(\sigma_1 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \left(\frac{h_1}{f_{f1}}\right)\right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \sigma_{\sigma 1} = 8.104$$

Другий оптичний елемент

Дано :

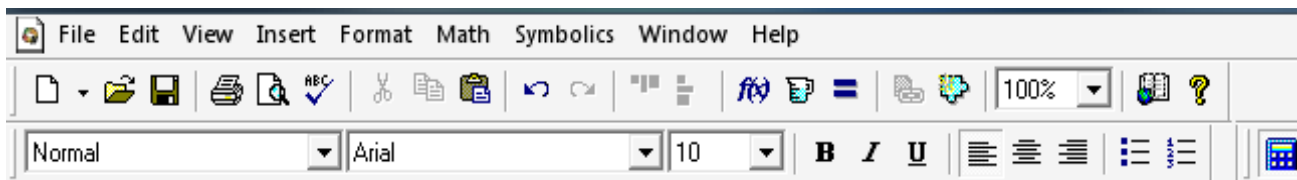
*беремо вихідні дані із попереднього розрахунку оптичної системи

- відстань d_1 (в даному випадку це відстань a_2 із попереднього розрахунку оптичної системи)

$$d := 29 \cdot 10^{-3}$$

- фокусна відстань

$$f_2 := -4.189 \cdot 10^{-3} \quad f_{f2} := 4.189 \cdot 10^{-3}$$



4. Визначаємо відстань розташування попереднього зображення до другого оптичного компоненту

$$a_2 = a_1' - d_1 \quad a_2 := a_1 - d \quad a_2 = -0.015$$

5. Визначаємо відстань після проходження другого оптичного компоненту

$$a_2' = \frac{a_2 \cdot f_2'}{a_2 - f_2} \quad aa_2 := \frac{a_2 \cdot ff_2}{a_2 - f_2} \quad aa_2 = 5.812 \times 10^{-3}$$

6. Визначаємо висоту падіння променя на другий оптичний компонент

$$h_2 = h_1 - d_1 \cdot \operatorname{tg}(\sigma_2) \quad \sigma_2 := \sigma_1 \quad \sigma_2 = 8.104$$

$$h_2 := h_1 - d \cdot \tan\left(\sigma_2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad h_2 = -2.136 \times 10^{-3}$$

8. Визначаємо кут виходу променя із другого оптичного компоненту

$$\sigma_2' = \sigma_k = \operatorname{arctg}\left(-\frac{f_2}{f_2'} \cdot \operatorname{tg}(\sigma_2) + \left(\frac{h_2}{f_2'}\right)\right)$$

$$\sigma_2 := \left[\operatorname{atan}\left[\left(\frac{-f_2}{ff_2}\right) \cdot \tan\left(\sigma_2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + \left(\frac{h_2}{ff_2}\right)\right] \cdot \frac{180}{\pi} \right] \quad \sigma_2 = -20.178$$

9. Визначаємо лінійне збільшення двохкомпонентної оптичної системи

$$\beta = -\frac{f}{f'} \prod_{m=1}^{m=k} \left(\frac{a'}{a}\right)_m \quad \beta := \left(\frac{aa_1}{a_1}\right) \cdot \left(\frac{aa_2}{a_2}\right) \quad \beta = 0.155$$

Тоді розмір зображення

$$y' = \beta \cdot y \quad Ddgerelo := 8.5 \cdot 10^{-3}$$

$$df := \beta \cdot Ddgerelo \quad df = 1.317 \times 10^{-3}$$

+

Завдання 3. Розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему матричним методом

1. Записуємо загальну матрицю перетворення для першого компоненту

$$M_1 = \mathfrak{T}_1 \cdot M_{1\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a'_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f'_1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2. Розв'язавши матрицю у символьному вигляді, визначаємо відстань a'_1 . Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля і виражаємо шуканий параметр за допомогою функції



2. Записуємо загальну матрицю перетворення для другого компоненту

$$M_2 = \mathfrak{T}_2 \cdot M_{2\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_1 = \begin{pmatrix} 1 & a'_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f'_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4. Розв'язавши матрицю у символьному вигляді, визначаємо відстань a'_2 . Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр

5. Записуємо загальну матрицю перетворення для перевірки розрахунків

$$M_{\Sigma} = \mathfrak{T}_2 \cdot M_{2\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_1 \cdot M_{1\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{T}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a'_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f'_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f'_1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

6. Розв'язавши матрицю у символьному вигляді, визначаємо відстань a'_2 . Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр (див.п.2)

7. Розв'язуємо отримані матриці. Задаємо вихідні дані для розрахунку

Розмір предмету (джерело випромінювання)	$y_1 = 4.25 \text{ мм}$	*задаємо $\frac{1}{2}$ від діаметру 8,5 мм, оскільки розрахунок ведеться для предмету, о розташований над оптичною віссю
Задня фокусна відстань першого компоненту	$ff1 = 10 \text{ мм}$	* ff позначено для зручності, щоб відрізнити передню та задню фокусну відстань. Можливе будь-яке інше зручне для Вас позначення
Задня фокусна відстань другого компоненту	$ff2 = 4,189 \text{ мм}$	
Апертурний кут променю	$\sigma_1 = 3,26^\circ$	*значення взято із попереднього розрахунку оптичної системи
Відстань до I-го оптичного компонента	$-a_1 = 35 \text{ мм}$	
Відстань між оптичними елементами	$d = 29 \text{ мм}$	

8. Виводимо результат розрахунку для кожного оптичного елемента та системи в цілому

Зображення предмету

Апертурний кут в області зображення предмету

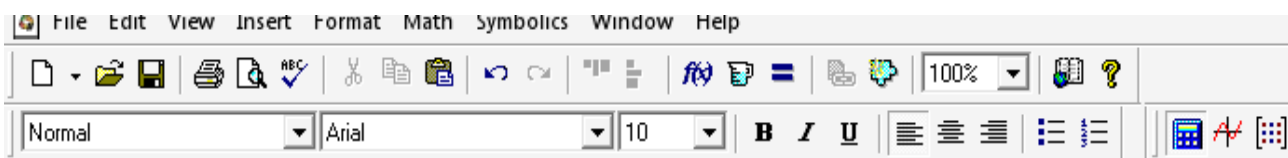
$$\begin{bmatrix} y' \\ \sigma' \end{bmatrix}$$

Лінійне збільшення оптичної системи

Оптична сила системи

Кутове збільшення оптичної системи

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$



Приклад розрахунку складна система матричним методом

1. Записуємо загальну матрицю перетворення для першого компоненту

$$M_1 = \mathfrak{S}_1 \cdot M_{1\text{линзу}} \cdot \mathfrak{S}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a_1' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & aa1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/ff1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa1}{ff1} & -\left(1 - \frac{aa1}{ff1}\right) \cdot a1 + aa1 \\ -\frac{1}{ff1} & \frac{1}{ff1} \cdot a1 + 1 \end{bmatrix}$$

2. Розв'язавши матрицю у символному вигляді, визначаємо відстань aa1. Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр

$$-\left(1 - \frac{aa1}{ff1}\right) \cdot a1 + aa1$$

Результат виводу формули для знаходження відстані $aa1 = \frac{a1}{(a1 + ff1)} \cdot ff1$

3. Записуємо загальну матрицю перетворення для другого компоненту

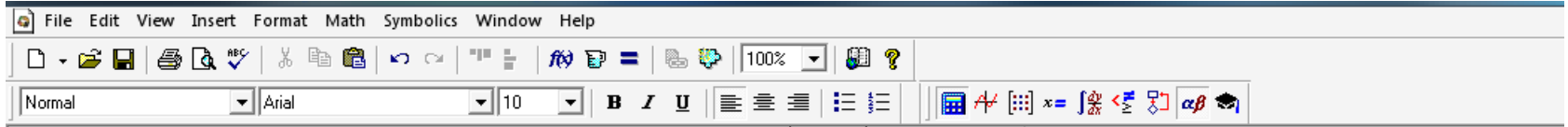
$$M_\Sigma = \mathfrak{S}_2 \cdot M_{2\text{линзу}} \cdot \mathfrak{S}_1 = \begin{pmatrix} 1 & a_2' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & aa2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/ff2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa2}{ff2} & -\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot a2 + aa2 \\ -\frac{1}{ff2} & \frac{1}{ff2} \cdot a2 + 1 \end{bmatrix}$$

4. Розв'язавши матрицю у символному вигляді, визначаємо відстань aa2. Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр

$$-\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot a2 + aa2$$

Результат виводу формули для знаходження відстані $aa2 = \frac{a2}{(a2 + ff2)} \cdot ff2$



5. Записуємо загальну матрицю для перевірки розрахунків

$$M_{\Sigma} = S_2 \cdot M_{2, \text{лінзу}} \cdot S_1 \cdot M_{1, \text{лінзу}} \cdot S_0 = \begin{pmatrix} 1 & a_2' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & aa2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/ff2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/ff1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa2}{ff2} - \frac{\left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2 \right]}{ff1} & \left[1 - \frac{aa2}{ff2} - \frac{\left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2 \right]}{ff1} \right] \cdot a1 + \left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2 \\ -\frac{1}{ff2} - \frac{\left(-\frac{1}{ff2} \cdot d1 + 1 \right)}{ff1} & \left[-\frac{1}{ff2} - \frac{\left(-\frac{1}{ff2} \cdot d1 + 1 \right)}{ff1} \right] \cdot a1 - \frac{1}{ff2} \cdot d1 + 1 \end{bmatrix}$$

6. Розв'язавши матрицю у символному вигляді, визначаємо відстань aa2. Для цього коефіцієнт В матриці прирівнюємо до нуля в виражаємо шуканий параметр

$$-\left[1 - \frac{aa2}{ff2} - \frac{\left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2 \right]}{ff1} \right] \cdot a1 + \left(1 - \frac{aa2}{ff2} \right) \cdot d1 + aa2$$

Результат виводу формули для знаходження відстані

$$aa2 = \frac{(-a1 \cdot ff1 + a1 \cdot d1 + d1 \cdot ff1)}{(-a1 \cdot ff1 + a1 \cdot d1 - a1 \cdot ff2 + d1 \cdot ff1 - ff2 \cdot ff1)} \cdot ff2$$

7. Розв'язуємо отримані матриці для першого та другого компонентів

Дано:

- розмір предмету (джерело випромінювання)

- задня фокусна відстань першого компоненту

- задня фокусна відстань другого компоненту

- апертурний кут променя

- відстань до першого оптичного

компоненту

- відстань між оптичними елементами

$$y1 := 4.25 \cdot 10^{-3}$$

$$ff1 := 10 \cdot 10^{-3}$$

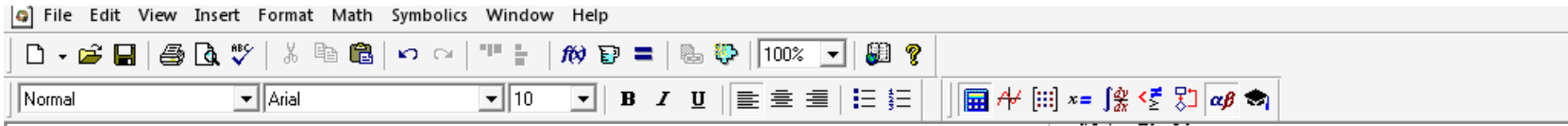
$$ff2 := 4.189 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma1 := -3.26$$

$$a1 := -35 \cdot 10^{-3}$$

$$d1 := 29 \cdot 10^{-3}$$

Важко сказати, чи правильно я це зробив



Результат розрахунку для першого оптичного компоненту

$$aa1 := \frac{a1}{(a1 + ff1)} \cdot ff1 \quad aa1 = 0.014$$

$$\begin{pmatrix} A1 & B1 \\ C1 & D1 \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa1}{ff1} & -\left(1 - \frac{aa1}{ff1}\right) \cdot a1 + aa1 \\ -\frac{1}{ff1} & \frac{1}{ff1} \cdot a1 + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A1 & B1 \\ C1 & D1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.4 & 0 \\ -100 & -2.5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy1 \\ \sigma\sigma1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A1 & B1 \\ C1 & D1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y1 \\ (\sigma1) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy1 \\ \sigma\sigma1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.7 \times 10^{-3} \\ 7.725 \end{pmatrix}$$

Результат розрахунку для другого оптичного компоненту

$$a2 := aa1 - d1 \quad aa2 := \frac{a2}{(a2 + ff2)} \cdot ff2 \quad aa2 = 5.812 \times 10^{-3} \quad \sigma2 := 7.725$$

$$a2 = -0.015$$

$$\begin{pmatrix} A2 & B2 \\ C2 & D2 \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa2}{ff2} & -\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot a2 + aa2 \\ -\frac{1}{ff2} & \frac{1}{ff2} \cdot a2 + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A2 & B2 \\ C2 & D2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.387 & 0 \\ -238.72 & -2.581 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy2 \\ \sigma\sigma2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A2 & B2 \\ C2 & D2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} yy1 \\ (\sigma2) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy2 \\ \sigma\sigma2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.587 \times 10^{-4} \\ -19.531 \end{pmatrix}$$

Результат розрахунку для двохкомпонентної оптичної системи

$$aa2 := \frac{(a1 \cdot ff1 - a1 \cdot d1 - d1 \cdot ff1)}{(a1 \cdot ff1 - a1 \cdot d1 + a1 \cdot ff2 - d1 \cdot ff1 + ff2 \cdot ff1)} \cdot ff2 \quad aa2 = 5.812 \times 10^{-3}$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} 1 - \frac{aa2}{ff2} - \frac{\left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot d1 + aa2 \right]}{ff1} & -\left[1 - \frac{aa2}{ff2} - \frac{\left[\left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot d1 + aa2 \right]}{ff1} \right] \cdot a1 + \left(1 - \frac{aa2}{ff2}\right) \cdot d1 + aa2 \\ -\frac{1}{ff2} - \frac{\left(\frac{-1}{ff2} \cdot d1 + 1\right)}{ff1} & -\left[-\frac{1}{ff2} - \frac{\left(\frac{-1}{ff2} \cdot d1 + 1\right)}{ff1} \right] \cdot a1 - \frac{1}{ff2} \cdot d1 + 1 \end{bmatrix}$$

+

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.155 & 0 \\ 353.569 & 6.452 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy2 \\ \sigma\sigma2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y1 \\ (\sigma1) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} yy2 \\ \sigma\sigma2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.587 \times 10^{-4} \\ -19.531 \end{pmatrix}$$

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Фотоелектрична система. Основні складові частини. Вимоги до елементів.
2. Двокомпонентна оптична система. Основні параметри.
3. Габаритний розрахунок складної оптичної системи.
4. Як визначити фокусні відстані об'єктиву та конденсора складної оптичної системи.
5. Як визначається лінійне збільшення конденсора β_2 за умови спряження вихідної зіниці об'єктиву з вихідною зіницею системи.
6. Пояснити алгоритм розрахунку ходу променя крізь складну оптичну систему.
7. Пояснити розрахунок ходу променя крізь складну оптичну систему матричним методом.
8. Записати загальну матрицю перетворення для двокомпонентної оптичної системи.

Література

1. Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів: навч. посібник / А. С. Литвиненко, Г. О. Петченко, О. М. Ляшенко, О. М. Діденко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 139 с.
2. Кравченко І.В. Моделювання оптико-електронних приладів: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / І. В. Кравченко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 113с.
3. Чиж І. Г. Теорія оптичних систем : підручник / І. Г. Чиж. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 426 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №10

ТОЧНІСНИЙ РОЗРАХУНОК ОЕП

Мета роботи

Ознайомитися з методикою розрахунку точності ОЕП на прикладі пожежного оповіщувача

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Призначення оптичної схеми ОЕП.
2. Основні складові частини передавальної частини оптичної системи.
3. Основні складові частини приймальної частини оптичної системи.
4. Загальні метрологічні вимоги до елементів ОЕП.

2. Теоретичні відомості

2.1 Узагальнена схема ОЕП

Оптична система є одним із найбільш важливих вузлів ОЕП. В загальному випадку вона слугує:

- Для забезпечення необхідних енергетичних характеристик (світлотехнічних) співвідношень, тобто для забезпечення заданого рівня сигналу (або відношення сигнал/шум) на приймачі випромінювання шляхом збирання необхідної кількості енергії випромінювання, формування раціональної просторової структури пучка променів і його спектрального складу;
- Для отримання необхідної якості зображення спостережних об'єктів або полів, що призводить до необхідності забезпечити достатню просторову, часову, спектральну та енергетичну дозвільну здатність;
- Для виділення корисних оптичних сигналів на фоні можливих перешкод і визначення їх характерних ознак, для чого також необхідно забезпечити дозвільну здатність за одним або декількома параметрами оптичного сигналу.

Схема оптичної системи ОЕП містить передавальну та приймальну частини, представлена на рис.10.1. Такій схемі відповідає активний метод роботи, при якому забезпечується можливість керувати параметрами джерела випромінювання, який опромінює спостережний об'єкт. При пасивному методі роботи ОЕП, коли використовується власне випромінювання об'єкту, існує лише приймальна частина. В схемі не показані додаткові пристрої, які можуть входити до складу оптичної системи ОЕП (наприклад, сканувальний пристрій).

Передавальна система.

- *Джерело оптичного випромінювання.* Такими джерелами можуть бути фізичні процеси або явища, що протікають в просторі предметів та генерують власне випромінювання, або зовнішні як природні, так і спеціально організовані джерела. Вибір джерела випромінювання б зумовлений вимогами

забезпечити раціональні енергетичні співвідношення. В деяких випадках шляхом правильного вибору джерела можна спростити конструкцію ОЕП, наприклад, не вводити в передавальну систему оптичний фільтр 5 та окремих модулатор 3.

- *Середовище розповсюдження.* Через це середовище випромінювання проходить від простору предметів до приймальної частини ОЕП. Ним може бути вакуум, газ (в тому числі і атмосфера), рідини або тверді тіла. При проходженні крізь середовища інформаційні характеристики і параметри випромінювання піддаються зміні, пов'язаній із розсіюванням, поглинанням, заломленням, зміною степені і орієнтації поляризації та швидкості розповсюдження.

- *Оптична система.* Такі системи виконують функції первинної обробки інформації. При використанні некогерентного випромінювання функцією ОС є формування зображення, диспергування випромінювання за спектральним складом, розщеплення, додавання та зміна напрямку розповсюдження випромінювання. При використанні когерентного випромінювання за допомогою ОС вирішують досить складні задачі з логічної та математичної обробки інформації (інтегрування, диференціювання, просторова фільтрація, розпізнавання образів, перетворення Фур'є).

Об'єкти 2 передавальної оптичної системи формує діаграму спрямованості так, щоб отримати перекриття зони можливих переміщень опроміненого об'єкта 1.

Конденсор 4 передавальної системи слугує для збирання максимально можливої кількості потоку випромінювання від джерела, а в деяких випадках і для забезпечення раціональних співвідношень між площею перетину пучка і геометричними параметрами модулатора 3.

- *Оптичний фільтр.* Вибірково пропускає потік випромінювання за спектральним складом (за довжиною хвилі) з метою покращення відношення по потужності і енергії між потоками від джерел корисного сигналу та впливового фону.

Оптичний фільтр 5 призначений для виділення із всього спектру випромінювання джерела якоїсь частини, що сприяє, кращій селекції спостережного об'єкта на фоні перешкод, запобігає зайвому засвічуванню приймальної системи в цілому і приймача випромінювання, захисту наступних елементів передавальної оптичної системи від нагрівання і т.п.

- *Аналізатор зображення, або модулатор.* Перетворює розподіл освітленості в просторі зображення, або розподіл яскравості в просторі предметів у часову послідовність потоку випромінювання, що пройшов.

Модулятор 3 виконує роль в забезпеченні перешкодозахищеності ОЕП при активному методі роботи. Вибираючи режим роботи модулатора передавальної системи і його параметри і кодуєчи передавальну інформацію, можна виконати фільтрацію сигналу на фоні зовнішніх і внутрішніх перешкод.

Приймальна система. Найбільш жорсткі вимоги з точки зору перешкодозахищеності пред'являються до елементів і вузлів приймальної системи.

Об'єктив 7 повинен забезпечити одночасно і збирання необхідної кількості енергії, і утворення зображення необхідної якості, а в деяких випадках і захист від шкідливих зовнішніх дій.

Компенсатор 8 умовно показаний у вигляді плоскопаралельної пластинки. Використовується для забезпечення компенсаційного режиму слідкування за спостережним об'єктом або зміною його параметрів. З їх допомогою можна зменшити кутове поле об'єктиву, збільшити швидкодію, компенсувати вплив деяких перешкод.

При сучасному рівні технології в більшості випадків важко, а іноді і неможливо синтезувати і створити на практиці об'єктив і приймач випромінювання з необхідними параметрами і характеристиками. Тому до складу приймальної системи вводять спеціальні ланки – фільтри просторових 9 та оптичних частот 12. В деяких випадках в приймальній частині передбачається окремий модулятор 10. Важливу роль в боротьбі із внутрішніми шумами відіграє конденсор (колектив) 11. З його допомогою можна зменшити розмір чутливої площадки приймача, що зменшує рівень шумів останнього. Окрім того, використовуючи конденсор, можна шляхом «розмиття» розмірів зображення на цій площадці усунути шкідливий вплив нерівномірності чутливості по площадці приймача.

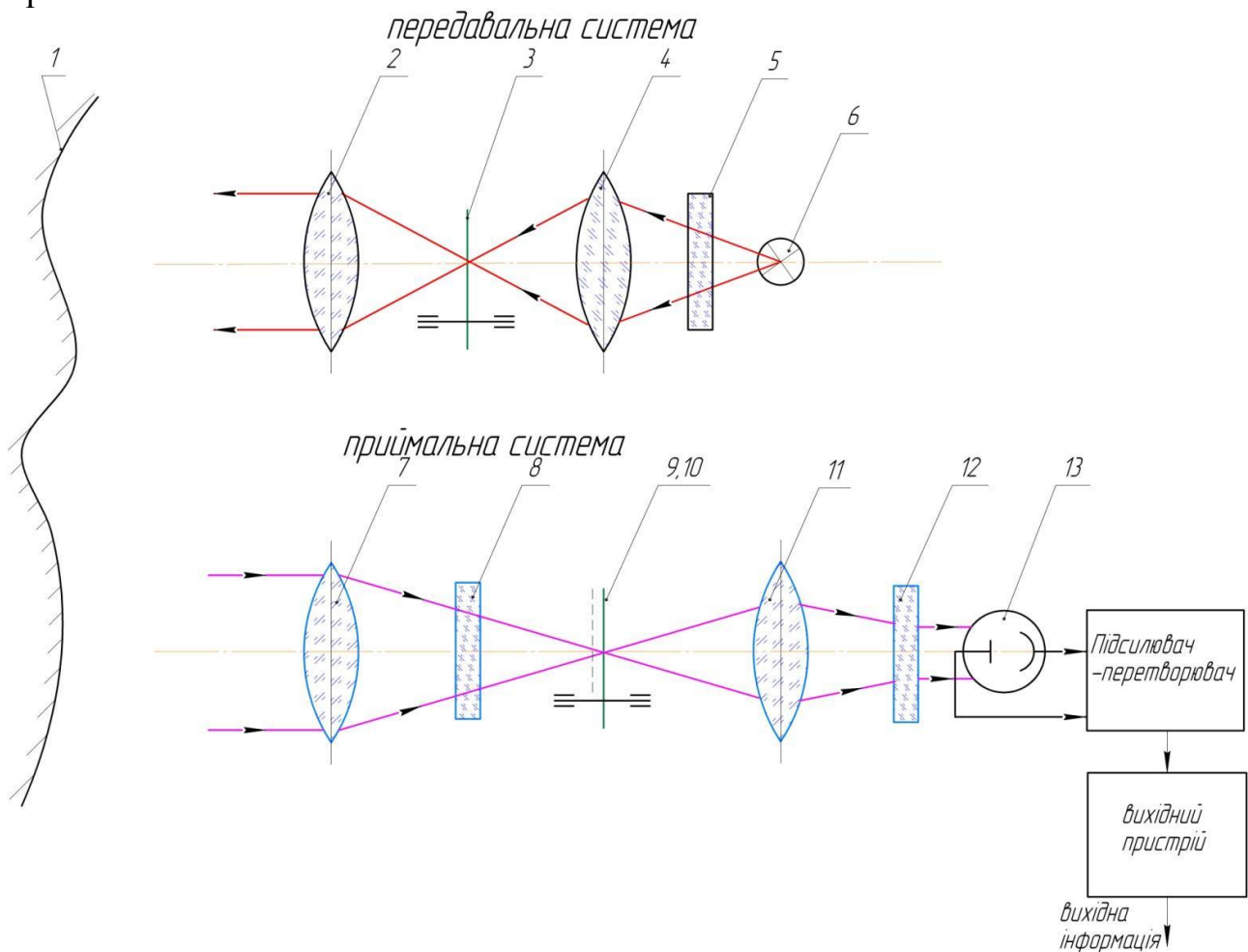


Рисунок 10.1 - Узагальнена схема ОЕП

- *Фотоприймач.* Виконує роль перетворювача оптичного випромінювання в електричний сигнал. На сьогодні існує велика кількість типів фотоприймачів з різними фізичними принципами роботи, спектральною чутливістю, конструктивним виконанням. Правильний вибір фотоприймача згідно з призначенням і умовами використання ОЕП являє собою одну із складних задач при проектуванні ОЕП. Характерною їх особливістю є те, що перетворення в них енергії електромагнітного випромінювання в електричний сигнал має статичний характер і завжди супроводжується генерацією перешкод. Тому на виході фотоприймачів сигнали завжди описуються випадковими функціями.

Параметри і характеристики приймача випромінювання ІЗ вибирають, із умови забезпечення необхідної чутливості і необхідної перешкодостійкості всього приладу. При цьому важливою задачею є узгодження параметрів приймача з параметрами оптичної системи ОЕП.

- *Підсилювач - перетворювач.* Виконує підсилення та обробку електричного сигналу. Зміст і послідовність обробки сигналу в ньому залежить від конкретного типу ОЕП та вирішуваних ним задач. Як правило, в цих пристроях виконується підсилення сигналу по амплітуді та потужності, фільтрація корисного сигналу від перешкод, розв'язання задач виявлення і селекції, декодування. Схеми цих пристроїв можуть бути достатньо складними і включати окремі електронні і напівпровідникові елементи, багатофункціональні мікросхеми та інші.

- *Вихідний пристрій.* Це може бути індикаторний пристрій (аналоговий або цифровий); відеоконтрольний пристрій, що відтворює розподіл інтенсивності і спектру випромінювання в просторі предметів; пристрій запису інформації з метою її зберігання з наступним аналізом або передачею; перетворювач для формування сигналу в наступну систему управління; виконавчий пристрій у вигляді електромеханічного, гідравлічного або пневматичного приводу.

2.2 Загальні метрологічні вимоги до елементів ОЕП

Вимоги до джерел оптичного випромінювання

Основні вимоги до ламп розжарювання встановлені [2-4].

Основні вимоги приладів напівпровідникових оптоелектронних встановлені [1-4].

Основні вимоги до напівпровідникових випромінювальних діодів встановлені [1-4].

Основні вимоги до лазерів встановлені [1-4].

Вимоги до середовища розповсюдження оптичного випромінювання

Більшість сучасних ОЕП працюють в умовах, коли випромінювання спостережного джерела проходить на приймальний пристрій ослабленим внаслідок впливу середовища, в якому воно розповсюджується.

Конструктор вже на стадії вибору принципової схеми приладу повинен враховувати вплив середовища, оскільки тільки при умові визначення характеру взаємодії випромінювання і середовища, в якому воно розповсюджується, можна вибрати та розрахувати основні вузли приймальної частини ОЕП.

Досить часто середовищем розповсюдження оптичного сигналу є атмосфера. Загальне ослаблення випромінювання в атмосфері зумовлено двома основними процесами:

- поглинанням газовими компонентами, в результаті якого проходить перетворення енергії випромінювання в інші її види;
- молекулярним та аерозольним ослабленням, або розсіюванням, яке полягає в зміні спрямованості випромінювання.

Поглинання викликано наявністю в атмосфері деяких речовин (води, вуглецевого газу, озону та інш.), які мають спектральні смуги поглинання в оптичній області.

Розсіювання енергії випромінювання на частинках, із яких складається середовище - це відхилення потоку від початкового напрямку. Також трапляється і молекулярне розсіювання випромінювання, і іноді необхідно враховувати випромінювання газів і частинок, що складають атмосферу.

Атмосфера помітно впливає на стан поляризації випромінювання, що проходить крізь неї. Неполаризоване випромінювання може стати частково поляризованим, а для поляризованого випромінювання, наприклад лазерного, можливий поворот вектора поляризації.

В деяких випадках необхідно враховувати випадкові зміни оптичних властивостей атмосфери. До них в першу чергу відносять флуктуації фази світлової хвилі внаслідок флуктуації показника заломлення атмосфери. Їх вплив проявляється в миготінні (випадковій зміні яскравості спостережного об'єкта) та тремтінні (випадковій зміні просторового положення зображення спостережного об'єкта).

Основні вимоги до оптичного волокна як середовища розповсюдження оптичного випромінювання встановлені [1-4].

Вимоги до оптичної системи.

Оптична система є одним із найбільш важливих вузлів ОЕП. В загальному випадку вона слугує:

- для забезпечення необхідних (світлотехнічних) співвідношень, тобто для забезпечення заданого рівня сигналу (або співвідношення сигнал/шум) на приймачі випромінювання шляхом збирання необхідної кількості енергії, формування раціональної просторової структури пучка променів і його спектрального складу і т.д.;
- для отримання необхідної якості зображення спостережних об'єктів або полів, що призводить до необхідності забезпечити достатню просторову, часову, спектральну і енергетичну дозвільну здатність;
- для виділення корисних оптичних сигналів на фоні можливих перешкод і визначення їх характерних ознак, для чого також необхідно

забезпечити дозвільну здатність за одним або декількома параметрами оптичного сигналу.

Виділяють декілька груп вимог, які є загальними для всіх оптичних систем:

- вимоги до оптичних характеристик;
- вимоги до габаритів системи;
- вимоги до якості зображення;
- вимоги до інтенсивності зображення (світловий потік, вила світла);
- вимоги, що належать до умов експлуатації оптичного приладу (теплостійкість, морозостійкість, допустимі вібрації і ударні навантаження, радіаційна дія, атмосферний тиск і т.д.).

Для телескопічних систем (дальній предмет – дальнє зображення) основні характеристики наступні:

- ✓ Γ_T - видиме збільшення (відношення тангенсів кутів, під яким око бачить зображення крізь оптичну систему та предмет без неї);
- ✓ D - діаметр вхідної зіниці, або D' - діаметр вихідної зіниці;
- ✓ 2ω - кутове поле в просторі предметів, або $2\omega'$ кутове поле в просторі зображення; для яких виконується співвідношення:

$$\Gamma_T = \frac{\operatorname{tg}(\omega')}{\operatorname{tg}(\omega)} = \frac{D}{D'} \quad (10.1)$$

- ✓ S_p - відстань від першої поверхні до вхідної зіниці, S'_p - відстань від останньої поверхні до вихідної зіниці.

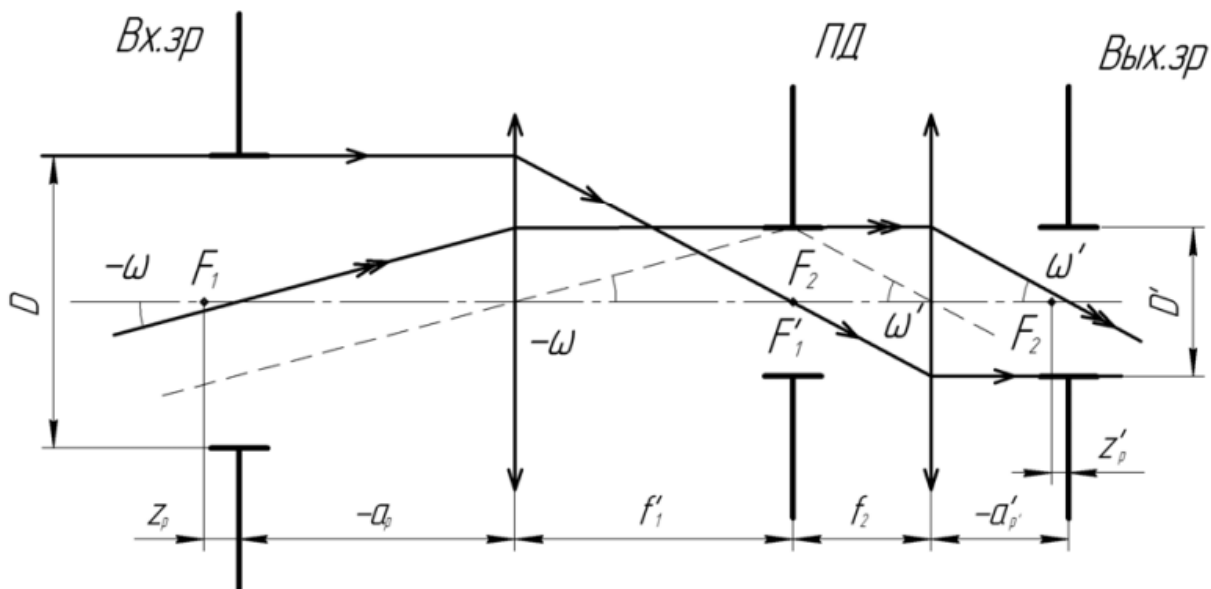


Рисунок 10.2 - Схема ходу променів в телескопічній системі Кеплера [4]

Видиме збільшення Γ_T та діаметр вхідної зіниці D телескопічної системи не можна вибирати довільно. Необхідно враховувати дифракційну дозвільну здатність, яка залежить від діаметру вхідної зіниці D та дозвільну здатність ока.

Дифракційна дозвольна здатність за критерієм Релея визначається для випадку, коли мінімум в зображенні однієї точки співпадає з максимумом в зображенні другої. Тоді кутова границя дозволу визначається:

$$\phi_d = \frac{1.22 \cdot \lambda}{D} \quad (10.2)$$

Дозвольна здатність зорової труби, пов'язана із обмеженою дозвольною здатністю ока, буде залежати від діаметру вихідної зіниці D' .

При $D' = 6 \text{ мм}$ (для бінокля):

$$\varphi_{ока} = \frac{23''}{\Gamma_T}; \varphi_d = \frac{140''}{D}; \Gamma_T = \frac{D}{6}.$$

При $D' = 1 \text{ мм}$ (для зорової труби великого збільшення):

$$\varphi_{ока} = \frac{140''}{\Gamma_T}; \varphi_d = \frac{140''}{D}; \Gamma_T = D.$$

На практиці виконується наступна умова:

$$0.2 \cdot D \leq \Gamma_T \leq 0.75 \cdot D \quad (10.3)$$

Для систем типу мікроскоп (ближній предмет – дальнє зображення) основні оптичні характеристики наступні:

- ✓ $\bar{\Gamma}$ - видиме збільшення;
- ✓ A - числова апертура $A = n \cdot \sin(\sigma)$;
- ✓ $2y$ - лінійне поле в просторі предметів.

Основні характеристики пов'язані співвідношенням:

$$\bar{\Gamma} = \frac{250 \cdot \text{tg}(\omega')}{y} = \frac{500 \cdot A}{D'} \quad (10.4)$$

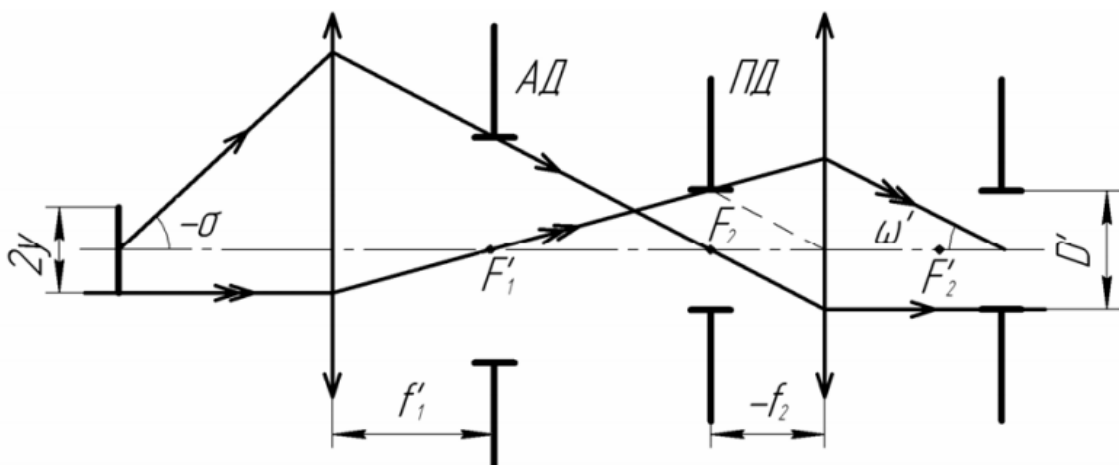


Рисунок 10.3 - Схема ходу променів в системі мікроскопа [4]

Мінімальний лінійний розмір об'єкту δ , який може бути бачити за допомогою світлового мікроскопу, визначається за формулою Аббе:

$$\delta_d = \frac{\lambda}{2 \cdot A} \quad (10.5)$$

Видиме збільшення \bar{G} та числова апертура A мікроскопу не можуть бути вибрані довільно через обмежену дозвільну здатність ока. Для видимого діапазону довжин хвиль виконується умова:

$$\bar{G} = (500 \dots 1000) \cdot A. \quad (10.6)$$

Діаметр вихідної зіниці мікроскопу, який на практиці приймає значення від 0,5 до 1 мм, визначається:

$$D' = \frac{500 \cdot A}{\bar{G}}. \quad (10.7)$$

Кутове поле в просторі зображення визначають за формулою:

$$\text{tg}(\omega') = \frac{y \cdot \bar{G}}{250}. \quad (10.8)$$

Для фотографічних систем (дальній предмет – ближнє зображення) основні оптичні характеристики наступні:

- ✓ f' - задня фокусна відстань;
- ✓ 2ω - кутове поле в просторі предмету;
- ✓ $\frac{D}{f'} = \frac{1}{k}$ - відносний отвір;
- ✓ k - діафрагментне число.

Основні характеристик пов'язані співвідношенням:

$$f' = \frac{y'}{\text{tg}(\omega)} = \frac{D}{2 \cdot A'} \quad (10.9)$$

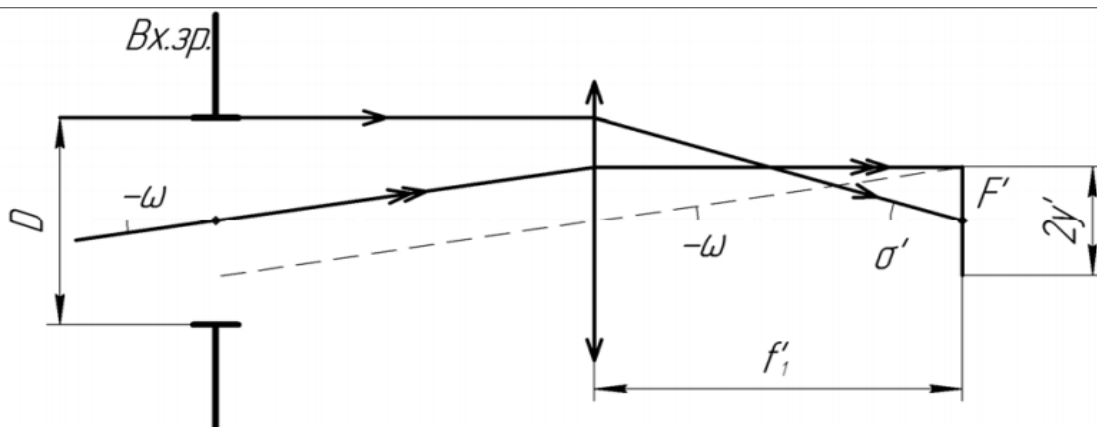


Рисунок 10.4 - Схема ходу променів у фотооб'єктиві

Діаметр зображення дорівнює:

$$2 \cdot y' = 2 \cdot f' \cdot \operatorname{tg}(\omega). \quad (10.10)$$

Співвідношення між фокусною відстанню f' , відносним отвором $\frac{D}{f'}$ та

кутовим полем в просторі предметів 2ω не може бути довільним. Для об'єтивів, працюючих в видимому діапазоні довжин хвиль 0,48 мкм-0,6438 мкм, виведено критерій добротності об'єктиву:

$$C = \frac{D}{f'} \cdot \operatorname{tg}(\omega) \cdot \sqrt{\frac{f'}{100}} = 0.22 \dots 0.26. \quad (10.11)$$

Цим інваріантом забезпечується фізична виконуваність об'єктиву. Якщо C менше критерію добротності, то система може бути реалізована з якістю зображення, необхідним для геометрично обмежених систем, якщо C більше критерію, то якість зображення буде незадовільною. На сьогодні із появою нових марок скла та удосконаленням методів розрахунку оптичних систем цей критерій може бути підвищеним.

Для систем типу проєкційних (ближній предмет – ближнє зображення) основні оптичні характеристики наступні:

- ✓ β - лінійне збільшення оптичної системи;
- ✓ L – довжина системи (відстань між площинами предметів та зображення);
- ✓ A – числова апертура в просторі предметів $A = n \cdot \operatorname{Sin}(\sigma)$, або $A' = n' \cdot \operatorname{Sin}(\sigma')$ - числова апертура в просторі зображення
- ✓ $2y$ - лінійне поле в просторі предметів, або $2y'$ - лінійне поле в просторі зображення.

Основні характеристики пов'язані співвідношенням:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{A}{A'}$$

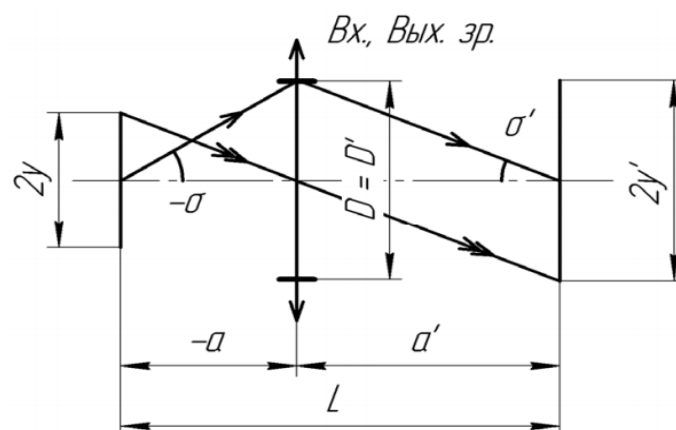


Рисунок 10.5 - Схема ходу променів в проєкційній установці

Вимоги до якості зображення ОС досить різноманітні і залежать від задачі, що вирішується за допомогою оптичної системи. Повного виправлення всіх аберацій неможливо отримати навіть в надскладній системі, та цього частіше за все і не потрібно. В реальних системах допускаються залишкові аберації, величини яких визначаються призначенням системи та приймачем зображення.

В телескопічних системах (дальній предмет – дальнє зображення), щ опрацюють із оком, добра якість зображення повинна бути в центрі поля, а на краю поля допускається погіршення якості зображення. Оскільки приймачем зображення є око, то допустимі значення аберації повинні бути менші або спів вимірні з дозвільною здатністю ока таблиця 10.1.

В мікроскопах (ближній предмет – дальнє зображення), що працюють з оком, також допускається погіршення якості зображення по полю. Через малий діаметр вихідної зіниці $D' = (0.5 - 1.0) \text{ мм}$ допустимі кутові аберації можуть складати $2' - 4'$, а хвильові аберації в центрі поля не повинні перевищувати $0,25 \cdot \lambda$. Якість зображення в мікроскопах багато в чому залежить від об'єктивів, які в залежності від конструкції мають різну якість зображення. В високоапертурних об'єктивах хвильова аберація в центрі поля не повинна перевищувати $0,1 \cdot \lambda$.

В фотооб'єктивах (дальній предмет – ближнє зображення) вимоги до якості зображення досить різноманітні і залежать від робочого спектрального діапазону, приймача зображення і призначення системи. В якості вимог до якості зображення слугують: дозвільна здатність в лін/мм в центрі поля і на краю, частотно-контрастна характеристика (ЧКХ) з вказанням частоти і необхідного контрасту, в ІЧ системах задається діаметр кружка розсіювання із заданою концентрацією енергії в ньому.

В проєкційних системах (ближній предмет – ближнє зображення) вимоги до якості зображення приблизно такі ж, що і в фотографічних системах.

Якість зображення в площині екрані можна оцінити за кутом, під яким спостерігач бачить кружок розсіювання. Якщо кут складає $1' - 2'$, то якість зображення задовільна.

Таблиця 10.1 - Значення аберацій для телескопічної системи

Назва аберацій	Якість зображення		
	задовільна	добра	відмінна
Точка на осі			
Сферична аберація			
• В кутовій мірі			
- На краю зіниці	$< 2'$	$< 1'$	$< 20''$
- На зоні зіниці	$< 1'$	$< 30''$	$< 10''$
Хроматизм положення	$< 8'$	$< 6'$	$< 3'$
Точка поза віссю			
Астигматизм	8	2	1,5
Кривизна поля, дптр			
- В меридіональному перетині	> -6	> -3	> -2

- В сагітальному перетині	< -2	< -1	< -0.1
Дисторсія, %			
- Для поля <50°	6	3	2
- Для поля >50°	9	5	4
Хроматизм збільшення на краю поля	< 8'	< 5'	< 3'

Основні параметри матеріалів, вимоги до об'єктивів та показників якості встановлені в [1-4].

Вимоги до оптичного фільтра

Оптичним фільтром називають пристрій, який слугує для зміни спектрального складу або ослаблення потоку випромінювання. Фільтри, які змінюють спектр випромінювання, називають спектральними, а фільтри, ослаблючі потік без помітної зміни спектру – нейтральними.

Зазвичай до параметрів фільтру висувають наступні вимоги:

- Висока контрастність $\tau_{\max} / \tau_{\min}$;
- Велика гранична крутизна, при якій $\Delta\lambda$ складає десяті, а іноді і тисячні частки мікрметра;
- Малі втрати $\tau > 80\%$;
- Можливість отримання заданих спектральних меж.

Таким чином оптичний фільтр вибирають з урахуванням ряду факторів, найважливішим із яких є намагання підібрати таку криву τ_{λ} , при якій з урахуванням спектру випромінювання і спектральної чутливості S_{λ} приймача (стоїть за фільтром), буде отримано максимальне співвідношення сигнал/перешкода.

Основні параметри оптичних фільтрів встановлені [3].

Вимоги до приймачів оптичного випромінювання

Окрім перетворення одного виду енергії (оптичної) в іншу (електричну) деякі спеціальні приймачі випромінювання і фото приймальні пристрої виконують і ряд інших функцій: перетворюють закон розподілу освітленості у відповідний електричний сигнал, слугують для аналізу закону розподілу освітленості в зображенні, визначення координат зображення та їх окремих зон, фільтрації корисного сигналу на фоні перешкод.

Основні документи, що встановлюють основні параметри та технічні характеристики на фотоеlementи [1-4].

Основні документи, що встановлюють основні вимоги до фотомножників [1-4].

Основні документи, що встановлюють основні вимоги до напівпровідникових приймачів [1-4].

Основні документи, що встановлюють вимоги до багатоелементних напівпровідникових позиційно-чутливих приймача оптичного випромінювання встановлено [4].

Вимоги до підсилювача – перетворювача

Розглянемо вимоги до підсилювально-перетворювального тракту на базі операційних підсилювачів та інтегральних аналогових та цифрових мікросхем, як найбільш розповсюдженим елементом для обробки сигналів з напівпровідникових фотоелектричних приймачів оптичного випромінювання. Основні стандарти, що встановлюють вимоги до інтегральних мікросхем наведено [1-4].

2.3 Критерії точності, класифікація приладних похибок та похибок вимірювання

Точнісні критерії якості оптико-електронних приладів

Забезпечення заданої точності вимірювання або слідування – одне із головних завдань при проектуванні ОЕП. Розв'язання її досягається шляхом розрахунку основних метрологічних параметрів ОЕП та зіставлення їх з вимогами технічного завдання. Результати точнісного розрахунку допомагають визначити вимоги до окремих вузлів приладу, допуски на похибки їх виготовлення та складання, допуски на параметри і характеристик елементів ОЕП та інш.

Як правило точність ОЕП визначається загальною допустимою похибкою, яка є сукупністю ряду складових:

- методичної похибки;
- інструментальної похибки;
- обчислювальної похибки;
- похибки впливових величин;
- суб'єктивної похибки.

Похибка методу вимірювання (теоретична похибка) - це похибка від недосконалості методу вимірювання. Вона може бути результатом теоретичної похибки, тобто помилковості або недостатньої розробки теорії прийнятого методу вимірювання, або допущених спрощень в рівняннях між величинами.

До похибок методу відносять неточність відомостей про фізичні фактори, наприклад, швидкості розповсюдження випромінювання в середовищі.

Обчислювальна похибка В більшості вимірюваннях для отримання результату здійснюють опрацювання первинних результатів вимірювань за відповідними виразами, залежностями, алгоритмами. Обчислення здійснюють при скінченній розрядності чисел. При цьому відбуваються заокруглення чисел і виникає похибка від цих заокруглень.

Похибки від впливових величин - є наслідком дії на об'єкт і засіб вимірювання зовнішніх факторів (теплових і повітряних потоків, магнітних, електричних, гравітаційних та інших полів, атмосферного тиску, вологості повітря, іонізаційного випромінювання). Одним із небажаних впливів довкілля є дія завод на вимірювальне коло. Вони проникають в коло шляхом паразитних зв'язків (провідного, індуктивного та ємнісного) між колом та електричними об'єктами, а також у вигляді електромагнітних наведень. Найбільш інтенсивним

джерелом завад у вимірювальних колах є силова електрична мережа промислової частоти. Для захисту елементів вимірювального кола від впливу завад застосовують їх екранування (магнітостатичне, електростатичне та електромагнітне), а також належне сумісне з'єднання та заземлення.

Суб'єктивна похибка - зумовлена індивідуальними особливостями оператора, що виконує вимірювання. Причиною її може бути неправильні навички виконання вимірювань (неправильний відлік десятих часток поділок шкали приладу).

Інструментальні похибки - залежать від похибок використаних засобів вимірювання. Своєю чергою містить ряд складових, до яких відносяться:

- похибка, що викликана не ідеальністю окремих ланок ОЕП, наприклад, наявністю шумів, дрейфів параметрів, що призводить до відмінності реальної функції перетворення від номінальної функції. Ця складова називається **основною похибкою**;

- похибка, що зумовлена реакцією приладу на зміну зовнішніх впливових факторів і неінформативних параметрів вхідного сигналу відносно із номінальних значень. Ця складова називається **додатковою похибкою**;

- похибка, що виникає як реакція приладу на швидкість або частоту зміни вхідного сигналу. Вона, як і основна похибка, залежить від властивостей окремих ланок приладу називається **динамічною похибкою**;

- похибка, що зумовлена взаємодією приладу і спостережного або підконтрольного об'єкту (об'єкту вимірювання). Ця складова зазвичай надзвичайно мала у порівнянні із трьома іншими.

Зазвичай вважають, що основна похибка складається із систематичної похибки Δ_{0s} (визначається математичним очікуванням), випадковою похибкою Δ_0 та випадковою похибкою квантування Δ_{0q} , яка має місце в аналогово-цифрових та цифрових приладах, тобто [2]:

$$\Delta_0 = \Delta_{0s} + \overset{\circ}{\Delta}_0 + \overset{\circ}{\Delta}_{0q} \quad (10.12)$$

В ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 даються рекомендації по врахуванню випадкової складової систематичної похибки. Номенклатура основних метрологічних характеристики, що використовується для розрахункової оцінки інструментальної складової загальної похибки, визначається ДСТУ ГОСТ 8.009:2008.

Всі метрологічні характеристики повинні бути вказані в нормативно технічній документації на ОЕП, причому повинні бути обумовлені або рекомендовані методи розрахунку інструментальної складової загальної похибки конкретного приладу для реальних умов його експлуатації.

До складу основних відносяться наступні метрологічні характеристики:

- Призначені для визначення результатів вимірювання, а саме функція перетворення, ціна поділки шкали вимірювального ОЕП, вид вихідного коду, число розрядів і ціна одиниці найменшого розряду цього коду;

- Похибки приладу: значення систематичної складової Δ_s ; середнє квадратичне відхилення $\sigma \left[\overset{\circ}{\Delta} \right]$ випадкової складової похибки; нормалізована автокореляційна функція $r_{\Delta}(\tau)$ або спектральна щільність $S_{\Delta}(\omega)$ цієї випадкової складової; функції або щільності розподілу ймовірностей систематичної і випадкової складової похибки; варіація N вихідного сигналу;
- Чутливість приладу до впливових величин: функції впливу, тобто залежності метрологічних характеристик від зміни умов експлуатації та інших впливових на точність факторів, а також зміна значень метрологічних характеристик при зміні цих факторів в визначених межах;
- Динамічні, в якості яких для ОЕП, що працюють як аналогові лінійні системи, вибирають: перехідну характеристику $h(t)$, імпульсну перехідну характеристику $g(t)$, частотну характеристику $G(j\omega)$ або передаточну функцію $G(s)$, постійну часу і час релаксації (час установки вихідного сигналу), а для аналого-цифрових та цифрових ОЕП – похибка t_d датованого відліку, максимальну частоту вимірювання f_{\max} .

Встановлення комплексу нормованих метрологічних характеристик для конкретного приладу починають з вибору моделі похибки. Одна із таких моделей, передбачена ДСТУ ГОСТ 8.009:2008, для інструментальної складової похибки має вигляд [1]:

$$\Delta_i = \Delta_{os} \cdot \overset{\circ}{\Delta}_0 \cdot \overset{\circ}{\Delta}_{0H} \cdot \sum_{i=1}^l \Delta_{ci} \cdot \Delta_{dyn} \cdot \Delta_{int} \quad (10.13)$$

де Δ_{os} , $\overset{\circ}{\Delta}_0$ - систематична і випадкова складова основної похибки приладу;

$\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$ - випадкова складова основної похибки, зумовлена гістерезисом;

$\sum_{i=1}^l \Delta_{ci}$ - поєднання додаткових похибок, зумовлених дією зовнішніх впливових величин і неінформативних параметрів вхідного сигналу;

Δ_{dyn} - динамічна похибка;

l - кількість додаткових похибок, що суттєво впливають на точність приладу;

Δ_{int} - складова похибки, зумовлена взаємодією приладу з об'єктом вимірювання або контролю

* - знак позначає поєднання окремих складових, тобто функціонал, який дозволяє розрахувати похибку, зумовлену сумісною дією окремих складових.

Іншою моделлю похибки може бути [1]:

$$\Delta_i = \Delta_0 \cdot \sum_{i=1}^l \Delta_{ci} \cdot \Delta_{dyn} \quad (10.14)$$

Δ_0 - основна похибка без розподілу її на складові.

Таку модель використовують в тих випадках, коли $\overset{\circ}{\Delta}_0$ можна вважати досить малою, тобто виконуються одночасно дві нерівності [1]:

$$\frac{\sigma\left[\overset{\circ}{\Delta}\right]}{H_0} \leq 0.9 \quad \text{та} \quad \frac{\sigma\left[\overset{\circ}{\Delta}\right]}{\Delta_{0sp}} \leq 0.1 \quad (10.15)$$

де $\sigma\left[\overset{\circ}{\Delta}\right]$ - середнє квадратичне відхилення випадкової складової основної похибки;

H_0 - основа закону розподілу $\overset{\circ}{\Delta}_0$;

Δ_{0sp} - границя допустимої систематичної складової основної похибки.

Якщо систематична складова інструментальної похибки може бути вилучена або уточнена, а загальна похибка визначається головним чином випадковими складовими, тоді в якості її моделі приймають [1]:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_m^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{dyn}^2 + \sigma_{ш}^2 \quad (10.16)$$

де $\sigma_{\Sigma}^2, \sigma_m^2, \sigma_i^2, \sigma_{dyn}^2, \sigma_{ш}^2$ - дисперсії випадкових складових загальної (сумарної) похибки і її складових: методичної, інструментальної, динамічної та шумової.

Варіацією Н похибки вимірювального приладу називається основа закону розподілу випадкової складової $\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$ похибки, зумовленої гістерезисом, тобто різниця між двома математичними очікуванням інформативного параметру вихідного сигналу, отриманих при вимірюванні однієї і тієї ж величини з повільним підходом до неї зі сторони менших $\bar{\Delta}'$ та більших значень $\bar{\Delta}''$.

Статичну оцінку Δ_{sH} систематичної складової Δ_s похибки конкретного екземпляру ОЕП розраховують за формулою [1]:

$$\bar{\Delta}_{sH} = \frac{\bar{\Delta}' + \bar{\Delta}''}{2} \quad (10.17)$$

де $\bar{\Delta}' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^l \Delta'_i$; $\bar{\Delta}'' = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^l \Delta''_i$ - середнє значення.

Оцінка $\sigma\left[\overset{\circ}{\Delta}_H\right]$ середнє квадратичного відхилення випадкової складової похибки конкретного екземпляру ОЕП [1]:

$$\sigma\left[\overset{\circ}{\Delta}_H\right] = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n (\Delta'_i - \bar{\Delta}')^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta''_i - \bar{\Delta}'')^2\right)}{(2 \cdot n - 1)}} \quad (10.18)$$

При $\tilde{H} = 0$ отримаємо [1]:

$$\sigma \left[\Delta_H \right] = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^{2n} (\Delta'_i - \bar{\Delta}'_s)^2 \right)}{(2 \cdot n - 1)}} \quad (10.19)$$

Оцінка $\tilde{M}(\Delta_s)$ математичного очікування систематичної складової похибки приладу будь-якого типу [1]:

$$\tilde{M}(\Delta_s) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \tilde{\Delta}_{si} \quad (10.20)$$

де m - кількість приладів, що використовуються при оцінці $\tilde{M}(\Delta_s)$;

$\tilde{\Delta}_{si}$ - значення Δ_s для i -го екземпляру приладу.

Для сукупності приладів даного типу систематична складова похибки розглядається як випадкова величина, тоді оцінка $\tilde{\Delta}_{si}$ її середньо квадратичного відхилення визначається [1]:

$$\bar{\sigma}[\Delta_s] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\Delta_{si} + \tilde{M}[\Delta_s])}{m - 1}} \quad (10.21)$$

Достатньо в загальному вигляді дійсну і номінальну (розрахункову) характеристику перетворення можна представити в наступному вигляді [2]:

$$\begin{aligned} y &= f(x, q_1, q_2, \dots, q_n, q'_1, q'_2, q'_l); \\ y_0 &= f_0(x_0, q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}, q'_{10}, q'_{20}, q'_{l0}) \end{aligned} \quad (10.22)$$

де y, y_0 - дійсне і номінальне значення інформативного параметру вихідного сигналу відповідно;

x, x_0 - теж для інформативного параметру вхідного сигналу;

$q_1, q_2, \dots, q_n, q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}$ - дійсне і номінальне значення конструктивних параметрів приладу або його вузлів та деталей;

$q'_1, q'_2, q'_l, q'_{10}, q'_{20}, q'_{l0}$ - дійсне і номінальне значення впливових факторів;

f, f_0 - дійсна і номінальна (характеристики) перетворення, що пов'язують x та y .

Загальна (повна) похибка приладу Δy_{Σ} є сумою похибок наближення $\Delta y_{\text{набл.}}$, визначається відхиленням вибраної номінальної розрахункової характеристики y від ідеальної (абсолютно точної), і функціональної похибки Δy_{ϕ} , що враховує відхилення дійсних значень x, q, q' від номінальних. Враховуючи величини Δy_{ϕ} малими, при n первинних по похибках

конструктивних параметрів та l впливових факторів в лінійному наближенні отримуємо [1]:

$$\Delta y_{\Sigma} = \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_0 \Delta x + [f(x, q_1, q_2, \dots, q_n, q'_1, q'_2, q'_l)] - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial q_i} \right)_0 \Delta q_i + \sum_{k=1}^l \left(\frac{\partial y}{\partial q_k} \right)_0 \Delta q'_k \quad (10.23)$$

Тут часткові похідні $\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)$, $\left(\frac{\partial y}{\partial q_i} \right)$, $\left(\frac{\partial y}{\partial q_k} \right)$ - передаточні функції

(коефіцієнти впливу) первинних похибок;

$\Delta x = x - x_0$ - відхилення інформативного параметру від номінального значення;

$[f(x, q_1, q_2, \dots, q_n, q'_1, q'_2, q'_l)]$ - теоретична інструментальна похибка (можна віднести до методичної похибки);

$\Delta q_i = q_i - q_{i0}$ - первинна інструментальна похибка i -го конструктивного параметру;

$\Delta q'_k = \Delta q'_k - \Delta q'_{k0}$ - зміна k -го впливового фактору;

«0» - індекс при часткових похідних вказує, що вони розраховані при номінальних значеннях q_{i0} і q'_{k0} без врахування похибок.

Записуємо останній вираз в більш загальному вигляді [1]:

$$\Delta y_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)_0 \Delta x_j + \sum_{p=1}^{\Phi} \Delta y_{\text{набл.}} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial q_i} \right)_0 \Delta q_i + \sum_{k=1}^l \left(\frac{\partial y}{\partial q_k} \right)_0 \Delta q'_k \quad (10.24)$$

Перша складова правої частина визначає методичну похибку, зумовлену неточністю знання або зміною вхідного сигналу, що залежить від m факторів і складається із m складових.

Друга складова - сума Φ теоретичних похибок. Третя складова є сумою n первинних інструментальних похибок. Четверта складова - сума додаткових похибок, викликаних l впливовими факторами. Вважаємо перші дві складові виразу складовими загальної методичної похибки Δ_M , третю складову - основною інструментальною похибкою Δ_{0i} і четверту - додатковою інструментальною похибкою $\Delta_{\text{додтк.}i}$ отримуємо [1]:

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta_M + \Delta_{0i} + \Delta_{\text{додтк.}i} \quad (10.25)$$

Узагальнена методика розрахунку інструментальних похибок [2]

Методи розрахунку інструментальних похибок досить різноманітні і залежать від особливості конструкції приладу, принципу роботи та технології виробництва.

Зазвичай основою розрахунку інструментальних похибок є складання рівняння похибки, яке виражає залежність загальної статичної похибки приладу від первинних похибок, властивих окремим ланкам.

Основні етапи розрахунку:

- Аналіз процесу вимірювання і складання структурної схеми приладу;
- Складання робочої формули для одиничного вимірювання, тобто визначення функціонального зв'язку між вхідним та вихідним сигналами через параметри окремих ланок. Іноді замість загального коефіцієнта передачі визначають коефіцієнти передачі окремих ланок;
- Визначення рівнянь похибок для окремих ланок и приведення їх до стандартної безрозмірної форми;
- Розподіл похибок на групи за законами їх розподілу (гаусівський, реєвський, закон Пуасона і т.д.) і підбір коефіцієнтів переходу від граничних значень похибок до середньоквадратичних для кожного закону; виявлення систематичних похибок;
- Складання рівняння похибок всього приладу додаванням похибок окремих ланок з їх коефіцієнтами впливу (ваговими коефіцієнтами), що залежать від структурної схеми приладу. Ці рівняння пов'язують похибки вихідного сигналу (кінцевого результату вимірювання) з частковими похибками окремих ланок і через них з параметрами конструкції і допусками на виготовлення окремих вузлів. Відповідно до мети розрахунку за допомогою рівняння похибки або визначається загальна інструментальна похибка приладу, або це рівняння вирішується відносно однієї із часткових похибок, що дозволяє встановити вимоги до однієї із ланки приладу.

Якщо відомі передавальні коефіцієнти окремих ланок, о другий і третій етапи складання рівняння похибок не викликає принципів ускладнень. При цьому зазвичай використовується розкладання в ряд по степенях вхідного сигналу функцій, що описують зв'язок сигналів на виході і вході окремих ланок. Складнішим є наступний етап, коли необхідно знати або визначити закони розподілу часткових похибок.

Одним із складних моментів точнісного розрахунку є виявлення джерел систематичних похибок і їх врахування. Це особливо складно зробити, якщо проводяться одиничні вимірювання, проте і у випадку багаторазових вимірювань боротьба із систематичними похибками є важливою задачею, яку вирішує конструктор ОЕП.

3. Виконання завдання

Завдання 3.1 Проаналізувати та розрахувати похибку для запропонованої структурно схеми пристрою пожежного оповіщувача

Структурна схема запропонованого пристрою представлена на рисунку 10.6. Із рисунка видно, що пристрій складається з трьох основних блоків, що в своєму складі мають ряд під блоків.

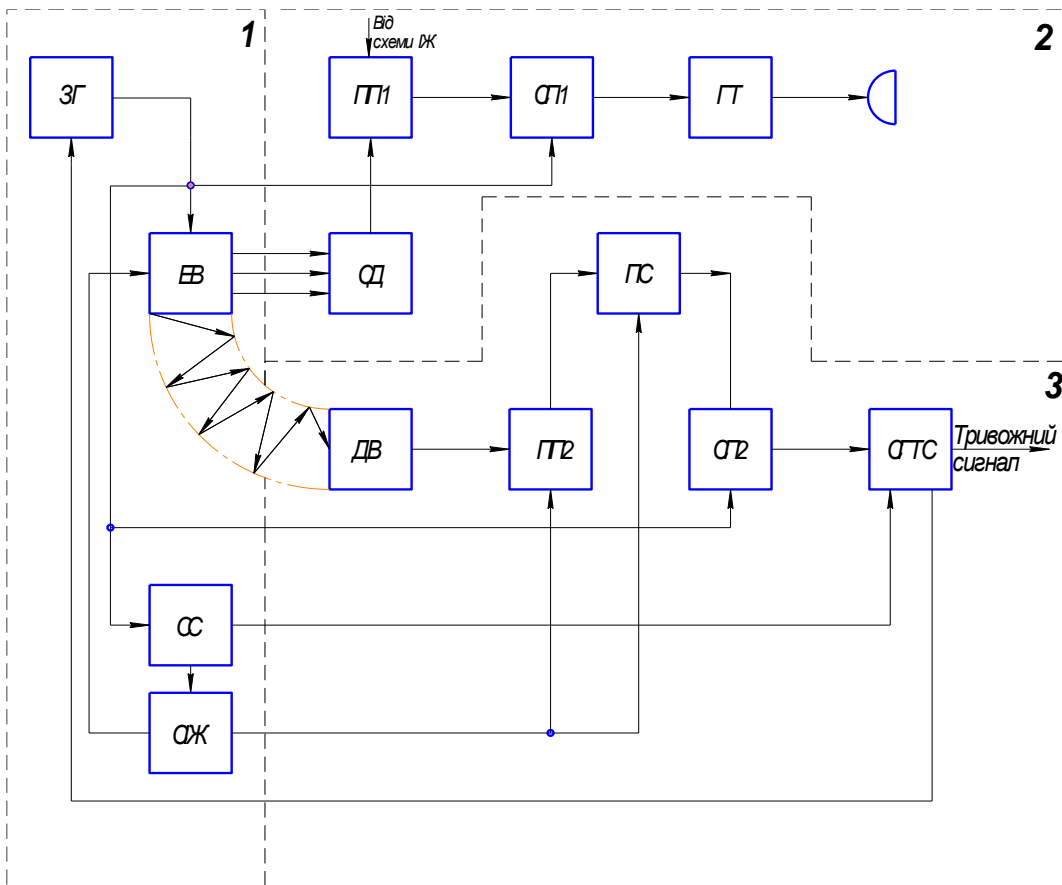


Рисунок 10.6 - Структурна схема протипожежного оповісшувача

Спочатку слід розглянути основну частину пристрою - датчик задимленості. Випромінюючий елемент не пов'язаний своєю оптичною віссю з датчиком випромінювання, вони розділені між собою таким чином, щоб випромінювання елемента не потрапляло на датчик за нормальних умов. У разі наявності диму у повітрі, часточки диму заповнюють простір між елементом випромінювання і датчиком, світловий потік від випромінювача розсіюється часточками диму і потрапляє на датчик випромінювання.

Також в дану конструкцію внесено додатковий датчик, що розташований так, що світло від випромінювального елемента потрапляє на нього без перешкод.

Випромінювальний елемент і датчики випромінювання працюють в інфрачервоному діапазоні світлового спектра.

Розглянемо роботу кожного з блоків по черзі.

Блок 1 – блок керівної частини пристрою. Він складається з задавального генератора ЗГ прямокутних імпульсів частотою 500 Гц. Даний генератор керує роботою всіх блоків схеми і є головним. Він подає живлячі імпульси на елемент випромінювання ЕВ (світлодіод). Також цей блок містить схему скиду і схему імпульсного живлення СЖ, призначення яких буде освітлено далі.

Блок 2 – блок перевірки працездатності елемента випромінювання. Відстежувальний датчик СД (фотодіод) отримує світлові імпульси від елемента

випромінювання ЕВ без перешкод на шляху світла. Отримані імпульси ідуть на попередній підсилювач ПП1, де вони підсилюються до необхідного для роботи схеми значення. Підсилені імпульси ідуть на схему порівняння СП1, де прийнятий імпульс порівнюється із імпульсом задавального генератора ЗГ. Якщо випромінювальний елемент працює ВЕ, згенерований імпульс задавального генератора ЗГ отримується після попереднього підсилювача ПП1 і схема порівняння не виконує ніяких дій – схема працює. У випадку непрацездатності елемента випромінювання ЕВ, імпульси від задавального генератора ЗГ не отримуються на відстежувальному датчику СД, відповідно попередній підсилювач ПП1 не реєструє зростання напруги і на схему порівняння СП1 надходять тільки імпульси від задавального генератора ЗГ. Тому схема порівняння видає імпульс запуску для генератора тону ГТ, що працює на частоті 4 кГц. Своєю чергою генератор тону видає звуковий сигнал за допомогою зумера, що попереджує про непрацездатність пристрою.

Блок 3 – блок опрацювання сигналу, що слідкує за наявністю диму у повітрі об'єму приміщення. Основні його складові частини. Датчик випромінювання ДВ, оптична ось якого віддалена від елемента випромінювання ЕВ і за нормальних умов світло на нього не потрапляє. Попередній підсилювач ПП2, що підсилює сигнал датчика ДВ до рівня необхідного для роботи схеми. Порогова схема ПС задає поріг спрацювання схеми на випадок наявності фону на датчику ДВ. Схема порівняння СП2 порівнює прийнятий датчиком сигнал (підсилений ПП2) із сигналом, виданим генератором ЗГ. Схема генерації тривожного сигналу СГТС створює певний час затримки до видачі тривожного сигналу, щоб уникнути збоїв схеми.

Цей блок 3 працює так: за відсутності задимленості датчик ДВ не реєструє імпульсного світлового потоку від випромінювального елемента, або реєструє імпульси малої амплітуди від фону, тому після підсилення ПП2 сигнал в схемі порівняння СП порівнюється із заданим. Схема порівняння СП налаштована так, що вона не пропускає імпульси від ПП2, у разі не відповідності їх амплітуді заданій. Тому далі сигнал не проходить.

У випадку задимленості об'єму між випромінювальним елементом ВЕ і датчиком ДВ з'являється світловий зв'язок. Прийняті імпульси ДВ підсилюються ПП2, потрапляють на порогову схему ПС, яка пропускає ці імпульси на схему генерації тривожного сигналу СГТС. Після почергового прийняття певної кількості імпульсів, схема видає два сигнали – тривожний і блокувальний, що потрапляє до від блоку задавального генератора і блокує роботу останнього, тому тривожний сигнал не переривається.

Також даний блок має ще один захист від перешкод і можливих спрацьовувань. Схема скиду СС переводить схему генерації тривожного сигналу СГТС в початковий стан у разі відсутності хоча б одного імпульсу за час затримки в СГТС.

Протипожежний пристрій обов'язково працює в цілодобовому режимі, тому очевидно, що він також цілодобово споживає електроенергію. Якщо

підрахувати кількість спожитої енергії вдень, то вийде зовсім мало, але якщо оцінити цю суму за рік, то ми отримаємо доволі велику кількість.

Щоб зменшити енергоспоживання даного пристрою слід використати імпульсне живлення його аналогових вузлів, які споживають велику кількість енергії. Таку функцію виконує схема імпульсного живлення СІЖ. Вона тактується від задавального генератора і подає напругу живлення на попередні підсилювачі ПП1 і ПП2, елемент випромінювання ЕВ і порогову схему ПС2 і з періодом 20 мс, а наступні 980 мс живлення відключене.

Такий підхід забезпечує економічне використання електроенергії пристроєм.

Основними показниками, що характеризують якість пристрою вважаються показники точності і надійності. Спочатку розглянемо перший з них. Даний показник має прямий зв'язок із якістю пристрою, що розробляється. Цей параметр нерозривно пов'язаний із похибками пристрою. Для даного пристрою похибкою буде відхилення характеристик окремих систем пристрою від номінальних (розрахованих), наприклад відхилення коефіцієнту підсилення операційного підсилювача. Тому очевидним є те, що чим менша сумарна похибка (від всіх систем пристрою разом), тим вищим вважається показник якості пристрою – точність. Оскільки для оцінки точності проводиться розрахунок сумарної похибки пристрою, то ми проведемо розрахунок похибок кожної системи пристрою (блоку), а потім виведемо загальну похибку. Але спочатку необхідно чітко визначити які саме похибки впливають на точність пристрою, що проектується.

Існує ряд похибок, що впливають на точність пристрою: систематична, прогресивна і випадкова похибки. Систематичними є похибки, що не змінюються протягом часу і є незмінними у часі функціями певних параметрів. Основна властивість систематичних похибок така, що їх можна майже повністю усунути, введенням певних корегувань або настройок пристрою. Особлива небезпечність похибок даного типу полягає в тому, що їх важко помітити.

До похибок такого типу, в нашому випадку, можна віднести:

- похибку оптичної системи пристрою, пов'язану із неточністю виготовлення;
- установки оптичних лінз;
- відхилення значення інтегральної чутливості фотодіоду;
- невідповідність світлового потоку від світлодіода номінальному значенню;
- можливе відбиття променів світла від світлодіода стінками димової камери датчика, що призведе до появи паразитної напруги на фотодіоді, та багато інших факторів.

Наступною є прогресивна похибка, тобто така, що повільно змінюється з плином часу. Така похибка, як правило, викликається процесами старіння тих або інших деталей апарату, а саме:

- пониження номінального значення напруги живлення,

- старіння резисторів, конденсаторів, активних елементів схеми (транзисторів мікросхем, світлодіодів),
- поява пилу у димовій камері, що осідатиме на лінзи і стінки камери і викликатиме додаткове розсіювання і відбиття променів та інш.

Особливістю прогресивних похибок є та обставина, що вони можуть бути скорегованими без виявлення причин їх появи шляхом введення поправок, але лише на цю мить часу, далі вони знову монотонно зростатимуть. Тому, на відміну від систематичної, прогресивні похибки потребують проведення корегування постійно через певний проміжок часу.

Далі розглянемо випадкову похибку. Випадковими називаються невизначені за своїм значенням або недостатньо вивчені похибки, при появі різних значень яких, не вдається встановити закономірності. Вони визначаються складною сукупністю причин, що важко піддаються аналізу. Їх окремі значення не можуть передбачатись, а для всієї сукупності може бути встановлена лише закономірність для частоти появи їх різних значень. Присутність випадкових похибок легко визначається шляхом повторного проведення контролю основних параметрів пристрою і проявляється у виді відхилень результатів вимірювань.

Очевидним є те, що перша похибка усунеться при першому налагодженні пристрою, а друга буде усуватись шляхом проведення перевірки пристрою через певні визначені проміжки часу, проведення профілактики появи пилу і заміни старих радіоелементів. Тому основна увага надається останньому класу похибок, оцінку яких ми і проведемо для даного протипожежного сповіщувача.

Як відомо, похибка може мати адитивну і мультиплікативну складові. Перша – це постійна похибка, що не змінюється із зміною впливових факторів, друга – це похибка яка лінійно збільшується або зменшується із зміною впливових факторів. Є ще дві складові похибки, які в силу своїх властивостей до уваги не беруться: похибка лінійності і гістерезису.

Для оцінки випадкової похибки пристрою використовують середньоквадратичне відхилення контрольованої величини, а сукупність ряду випадкових похибок відносять до певного закону розподілу (функція розподілу) випадкових величин. Закон розподілу випадкової величини - це співвідношення, що встановлює зв'язок між значеннями випадкової величини і ймовірностями появи цих значень. Як міра розсіювання параметрів контрольованої величини відносно номінального значення використовується середньоквадратичне відхилення контрольованої величини.

Далі проведемо оцінку похибок кожного блоку схеми пристрою окремо. До уваги беруться тільки основні аналогові схеми 3-го основного блоку структурної схеми. Очевидним є те, що необхідно оцінити похибку основної системи пристрою – оптичної. Задавальний генератор не має впливу на роботу пристрою; відхилення його частоти не вплине на схему, оскільки в ній немає точно налаштованих резонансних кіл, а відхилення форми сигналу також ніяк не несе впливу. Тому блок задавального генератора не береться до уваги. Наступними пов'язаними ланками є попередній підсилювач ПП2 і компаратор або порогова схема ПС. Похибки цих двох блоків обов'язково враховуються,

оскільки саме вони відповідають за вироблення тривожного сигналу. Всі інші блоки до уваги не беруться, оскільки вони не мають впливу на роботу системи сповіщення; хоча після компаратора йде схема порівняння і схема генерації тривожного сигналу, вони є цифровими, і їх робота є чіткою і просто виключає наявність похибок, що могло б вплинути на роботу схеми сповіщення (блок 3, рисунок 10.6).

Для проведення оцінки похибок кожної із визначених схем пристрою слід спочатку визначитись із вихідними даними для проведення розрахунків. Пристрій, що конструюється буде живитись напругою від блоку живлення, що в і собі буде споживати напругу мережі 220 В. Нестабільність даної напруги за звичайних умов складає $\gamma_U = 15\%$, а коефіцієнт стабілізації блоку живлення приймемо $K = 25$ (див. літературу [4]), тоді на виході стабілізатора ми матимемо коливання напруги:

$$\gamma_{жс} = \frac{\gamma_U}{K} = \frac{15\%}{25} = 0,6\% \quad (10.26)$$

Оскільки пристрій буде знаходитись в приміщенні, то для нашого кліматичного поясу діапазон температури навколишнього середовища, зазвичай, складає від -10 до $+35C$.

Почнемо проведення розрахунків із оптичної системи.

Щодо оптичної системи, то вона має широкий ряд факторів, що впливають на значення мультиплікативної похибки:

- зміна температури впливає на основні характеристики напівпровідникових світло та фотодіодів;
- зміна вологості впливає на початковий струм фотодіода, вплив сторонніх джерел освітлення, обігрівачів, коливання напруги живлення світлодіоду, та інш.

Аддитивна похибка пов'язана із:

- нерівномірністю оптичних характеристик матеріалу лінзи;
- неточністю їх встановлення і виготовлення,
- осідання пилу на поверхні камери, лінз призводить до появи додаткового розсіювання, та ін..

Основна похибка:

- оптичної системи даного пристрою була визначена шляхом проведення ряду експериментів за спеціальною методикою, що описана в [2] і складає $\gamma_0 = 0,15\%$, але без впливу джерела живлення елемента випромінювання і впливу коливань температури навколишнього середовища на елемент випромінювання і датчик.

- Зміна потужності випромінювання світлодіоду АЛ107Б складає $0,04\%$ при зміні температури навколишнього середовища на $10C$ (при збільшенні температури зростає) див. літературу [4].

- Зміна інтегральної чутливості фотодіода складає 0,02% при зміні температури навколишнього середовища на 10C (при збільшенні температури зростає).

Закон розподілу температурних похибок є рівномірним. Ці дві похибки є корельованими, тому ми знаходимо їх суму, що складе 0,06%, а відповідно до нашого випадку при зміні температури від -10 до $+35C$, температурна похибка буде:

$$\gamma_T = \frac{0,06\% \cdot \left[|10^\circ C| + |35^\circ C| \right]}{|10^\circ C|} = 0,27\% \quad (10.27)$$

Загальна похибка датчика визначається як середньо геометричне із складових:

$$\gamma_\partial = \sqrt{\gamma_0^2 + \gamma_{жс}^2 + \gamma_T^2} = \sqrt{0,15^2 + 0,6^2 + 0,27^2} = 0,67\% \quad (10.28)$$

Наступною до уваги приймається схема попереднього підсилення, що зібрана на операційному підсилювачі DA1 і супутніх елементах.

Він має мультиплікативну похибку коефіцієнту підсилення.

- Ця похибка розподіляється за трикутним законом розподілу випадкової величини [4]. Операційний підсилювач ввімкнений за інвертувальною схемою, має невелике значення похибки внаслідок глибокого зворотного зв'язку, тому коефіцієнт впливу напруги живлення на коефіцієнт підсилення складає $\psi_{II} = \frac{0,3}{10 \cdot \left(\frac{\Delta U}{U} \right)}$, а похибка складе, відповідно, $\pm 0,3\%$.

- Температурна похибка коефіцієнта підсилення складає $\gamma_T = 0,082\%$ (із врахуванням периферійних елементів) при зміні температури навколишнього середовища на 10C (при збільшенні температури зростає), а відповідно до нашого випадку при зміні температури від -10 до $+35C$, температурна похибка буде:

$$\gamma_T = \frac{0,082\% \cdot \left[|10^\circ C| + |35^\circ C| \right]}{|10^\circ C|} = 0,37\% \quad (10.29)$$

Загальна похибка підсилювача:

$$\gamma_{III} = \sqrt{\gamma_{жс}^2 + \gamma_T^2} = \sqrt{0,6^2 + 0,37^2} = 0,71\% \quad (10.30)$$

Наступною до уваги береться порогова схема, що зібрана на операційному підсилювачі DA3 і стабілітроні VD4.

- Температурна похибка дрейфу нуля компаратора DA3, аналогічна температурній похибці DA1, а похибка від напруги живлення також стала, тому похибка самого компаратора буде $\gamma_{III} = 0,71\%$

- Стабілітрон немає похибки від джерела живлення, але він має основну і температурну похибки. Основна похибка є в паспортних даних стабілітрона, а саме в значенні напруги стабілізації і складає максимальне значення $\gamma_0 = 0,5\%$.

- Температурна похибка складає 0,1% при зміні температури навколишнього середовища на 10C (при збільшенні температури зростає) див. літературу [4], а відповідно до нашого випадку при зміні температури від -10 до +35C, температурна похибка буде:

$$\gamma_T = \frac{0,1\% \cdot (|10^\circ C| + |35^\circ C|)}{|10^\circ C|} = 0,45\% \quad (10.31)$$

Загальна похибка порогової схеми:

$$\gamma_{PC} = \sqrt{\gamma_0^2 + \gamma_T^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,45^2} = 0,67\% \quad (10.32)$$

Повне значення похибки аналогового каналу пожежного сповіщувача скрадатиметься із похибок датчика, попереднього підсилювача і порогової схеми:

$$\gamma_\Sigma = \sqrt{\gamma_\delta^2 + \gamma_{III}^2 + \gamma_{PC}^2} = \sqrt{0,67^2 + 0,71^2 + 0,67^2} = 1,18\% \quad (10.33)$$

Отримали значення похибки 1,18% - це значення і є похибкою даного протипожежного сповіщувача. Нормальним вважається значення похибки пристрою, що не перевищує 1,5% див. літературу [4], тому загальна похибка пристрою є допустимою.

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Призначення оптичної схеми ОЕП.
2. Основні складові частини передавальної частини оптичної системи.
3. Основні складові частини приймальної частини оптичної системи.
4. Загальні метрологічні вимоги до елементів ОЕП.
5. Вимоги до оптичної системи для телескопічних систем.
6. Вимоги до оптичної системи для систем типу мікроскоп.
7. Вимоги до оптичної системи для фотографічних систем.
8. Вимоги до оптичної системи для систем типу проєкційних.
9. Точнісні критерії якості оптико-електронних приладів.
10. Математична модель інструментальної складової похибки.
11. Номенклатура основних метрологічних характеристик.
12. Узагальнена методика розрахунку інструментальних похибок.

Література

1. Розрахунок і конструювання оптико-електронних приладів: навч. посібник / А. С. Литвиненко, Г. О. Петченко, О. М. Ляшенко, О. М. Діденко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 139 с.
2. Чиж І. Г. Теорія оптичних систем : підручник / І. Г. Чиж. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 426 с.
3. Кравченко І.В. Моделювання оптико-електронних приладів: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / І. В. Кравченко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 113с.
4. Кучеренко О.К. Розрахунок і конструювання оптичних приладів. Частина 1 «Принципи конструювання і точність оптичних приладів»: Підручник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології» спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і технології» [Текст] / Уклад. : О. К. Кучеренко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 157 с.

Нормативні документи

ДСТУ 2321-93	Прилади електронні надвисоких частот. Лампи зворотної хвилі. Терміни та визначення *чинний
ДСТУ 2878-94	Лампи безперервної дії газорозрядні. Терміни та визначення *чинний
ДСТУ 2882-94	Лампи генераторні та модуляторні. Терміни та визначення
ДСТУ 4026-2001 (ГОСТ 8.155-2001)	Метрологія. Лампи температурні еталонні 1-го та 2-го розрядів. Методи та засоби метрологічної атестації, повірки і калібрування *чинний
ДСТУ EN ISO 11554:2019 (EN ISO 11554:2017, IDT; ISO 11554:2017, IDT)	Оптика та оптичні прилади. Лазери та лазерна апаратура. Методи випробування потужності, енергії та часових характеристик лазерного пучка *чинний
ДСТУ 2449-94	Прилади напівпровідникові. Терміни та визначення *чинний
ДСТУ 2683-94	Прилади напівпровідникові фотоелектронні. Терміни та визначення *чинний
ДСТУ 2847-94	Перетворювачі електроенергії напівпровідникові. Терміни та визначення *чинний
ДСТУ 3111-95	Модулі напівпровідникові. Терміни та визначення*чинний
ДСТУ 3480-96 (ГОСТ 20859.1-98)	Прилади напівпровідникові силові. Загальні технічні вимоги*чинний
ДСТУ 3596-97 (ГОСТ 30718-99)	Перетворювачі напівпровідникові побутові. Загальні технічні вимоги*чинний

ДСТУ 2380-94	Лазери і пристрої управління лазерним випромінюванням. Терміни та визначення*чинний
ДСТУ 7272:2012	Лазери газові. Загальні технічні умови*чинний
ДСТУ EN ISO 11145:2016 (EN ISO 11145:2016, IDT; ISO 11145:2016, IDT)	Оптика і фотоніка. Лазери та устаткування, пов'язане з лазерами. Словник і умовні позначки*чинний
ДСТУ EN ISO 11145:2019 (EN ISO 11145:2018, IDT)	Оптика та оптичні прилади. Лазери та лазерна апаратура. Словник термінів та умовні позначки*чинний
ДСТУ EN ISO 11252:2017 (EN ISO 11252:2013, IDT)	Лазери та устаткування, пов'язане з лазерами. Лазерні пристрої. Мінімальні вимоги до документації*чинний
ДСТУ ISO 12005:2005	Лазери і лазерна апаратура. Методи випробування параметрів лазерного пучка. Поляризація *чинний
ДСТУ 2812-94	Волоконно-оптичні системи передавання інформації. Компоненти. Загальні вимоги до конструювання*чинний
ДСТУ 3096-95	Перетворювачі електронно-оптичні. Терміни та визначення*чинний
ДСТУ 3256-95	Системи передавання волоконно-оптичні. Терміни та визначення*чинний
ДСТУ 3345-96	Системи передавання волоконно-оптичні. Загальні технічні вимоги*чинний
ДСТУ 3346-96	Системи передавання волоконно-оптичні бортові. Загальні технічні вимоги*чинний
ДСТУ 3509-97	З'єднувачі оптичні. Загальні технічні вимоги*чинний
ДСТУ ISO 9335:2006	Оптика та оптичні прилади. Функція передатна оптична. Принципи і методики вимірювання*чинний
ДСТУ IEC 60904-7:2008	Прилади фотометричні. Частина 7. Визначення похибки внаслідок спектральної невідповідності під час вимірювання характеристик фотоелектричного приладу.
ДСТУ IEC 60904-8:2008.	Прилади фотоелектричні. Частина 8. Вимірювання спектральних характеристик фотоелектричних приладів.
ДСТУ ISO 7944:2006	Оптика та оптичні прилади. Еталони довжин хвиль. *чинний
ДСТУ ISO 9334:2005	Оптика та оптичні прилади. Функція передатна оптична. Визначення понять та математичні відношення. *чинний
ДСТУ ISO 11421:2006	Оптика та оптичні прилади. Функція передатна оптична. Визначення понять та математичні відношення. *чинний
ДСТУ ГОСТ 4.447:2009	Прилади контрольно-вимірювальні оптико-механічні для вимірювання лінійних розмірів. Номенклатура показників. *не чинний
ДСТУ ГОСТ 4.448:2009	Прилади контрольно-вимірювальні оптико-механічні для вимірювання кутів. Номенклатура показників. *не чинний

ДСТУ ГОСТ 4.450:2009	Прилади і апаратура для спектрального аналізу. Номенклатура показників. *не чинний
ДСТУ ГОСТ 8.009:2008	Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань *не чинний
ДСТУ ГОСТ 8.207:2008	Державна система забезпечення єдності вимірювань. Прямі вимірювання з багатократними спостереженнями. Методи обробки результатів спостережень. Основні положення. *не чинний
ДСТУ ГОСТ 8.229:2008	Державна система забезпечення вимірювань. Спектрофотометри інфрачервоні. Методи і засоби повірки *не чинний
ДСТУ ГОСТ 8.258:2008	Державна система забезпечення вимірювань. Поляриметри и сахариметри. Методика повірки
ДСТУ ISO 13694:2009	Оптика й оптичні прилади. Лазери та лазерна апаратура. Методи випробування для визначення розподілу густини потужності (енергії) лазерного пучка *чинний
ДСТУ ІЕС 60825-1:2004	Безпечність лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання, вимоги та настанова користувачам *не чинний
ДСТУ ІЕС 60825-2:2006	Безпечність лазерних виробів. Частина 2. Безпечність волоконно-оптичних систем передавання *не чинний
ДСТУ ІЕС 60825-4-2003	Безпечність лазерних виробів. Частина 4. Лазерні захисні пристрої (ІЕС 60825-4:1997, ІДТ). *не чинний
ДСТУ ІЕС 60825-6-2001	Безпечність лазерних виробів. Частина 6. Безпечність для очей виробів із оптичними джерелами, використовуваних лише для передавання видимої інформації *не чинний
ДСТУ ІЕС 61040:2005	Детектори, прилади та устаткування для вимірювання потужності та енергії лазерного випромінення *чинний
ДСТУ EN 60904-4:2018	Прилади фотоелектричні. Частина 4. Еталонні сонячні прилади. Процедури встановлення простежуваності калібрування (EN 60904-4:2009, ІДТ; ІЕС 60904-4:2009, ІДТ) *чинний

*Примітка. Чинність нормативних документів перевірена по базі <https://csm.kiev.ua/> станом на 10.11.2024 року

ДОДАТОК А
Зразок оформлення титульної сторінки

Міністерство освіти і науки України
Черкаський державний технологічний університет
Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій

Звіт з практичних занять

З дисципліни

“ Оптико-електронні пристрої роботів”

Керівник

(П.І.П)

Виконав

Студент _____

(П.І.П)

Група

Залікова книжка №

Підпис

Черкаси 2025

Додаток Б Світловипромінювальні та фотоприймальні елементи

Таблиця Б1 - Фотометричні та електричні параметри світловипромінювальних діодів із спрямованим випромінюванням

Тип приладу	Конструкція	Колір світіння та довжина хвилі, мкм	Сила світла I_v , мкд			Постійна пряма напруга, U_{np} , В	Постійний пр. струм I_{np} , мА
			мін.	тип.	Макс		
АЛ102А	металоскляний корпус	червоний 0,69	0,04	0,1	0,15	2,8	5
АЛ102Б		червоний 0,69	0,1	0,2	0,25	2,8	10
АЛ102В		зелений 0,56	0,25	0,3	0,5	2,8	20
АЛ102Г		червоний 0,69	0,2	0,25	0,5	2,8	10
АЛ102Д		зелений 0,56	0,4	0,75	1,5	2,8	20
ЗЛ102А		червоний 0,69	0,02			3,0	5
ЗЛ102Б		червоний 0,69	0,10			3,0	10
ЗЛ102В		зелений 0,56	0,25			2,8	20
ЗЛ102Г		червоний 0,69	0,06			3,0	10
ЗЛ102Д		червоний 0,69	0,20			3,0	10
ЗЛ341А	металоскляний корпус	червоний 0,69-0,71	0,15			2,8	20
ЗЛ341Б		червоний 0,69-0,71	0,5				20
ЗЛ341В		зелений 0,55-0,56	0,15				22
ЗЛ341Г		зелений 0,55-0,56	0,5				22
ЗЛ341Д		жовтий 0,68-0,7 0,55-0,56	0,15				22
ЗЛ341Е		жовтий 0,68-0,7; 0,55-0,56	0,5				22
АЛ360А	металоскляний корпус	зелений 0,55-0,56	0,3			1,7	20
АЛ360Б			0,6				
ЗЛ360А			0,6				
ЗЛ360Б			0,6				
ИПД04А-1К	металоскляний корпус	червоний 0,7	15			2	30
ИПД04Б-1К			10				
КЛД901А	металоскляний корпус	синій 0,466	0,15			12	6

Таблиця Б2 - Світловипромінювальні діоди з розсіяним випромінювання

Тип приладу	Конструкція	Колір світіння та довжина хвилі, мкм	Сила світла I_v , мкд	Постійна пряма напруга, U_{np} , В	Постійний прямий струм I_{np} , мА	
АЛ307А	пластмасовий корпус	червоний 0,665	0,15	2	20	
АЛ307Б		червоний 0,665	0,9			
АЛ307В		зелений 0,567	0,4	2,8	22	
АЛ307Г		зелений 0,567	1,5			
АЛ307Д		жовтий 0,56; 0,7	0,4	2,5	22	
АЛ307Е			1,5			
АЛ307Ж			3,5			
АЛ307К		червоний 0,665	2	2	20	
АЛ307Н		зелений 0,567	6	2,8	22	
АЛ316А	пластмасовий з лінзою	червоний 0,67	0,8	2	20	
ЗЛ316А			0,25			
КИПД01А	пластмасовий	зелений 0,55-0,56	0,8	7	12	
КИПД01Б			0,6			
КИПД02А		червоний 0,7	0,4	2,8	20	
КИПД02Б			0,9			
КИПД02В		зелений 0,55	0,25	2,5		
КИПД02Г			0,5			
КИПД02Д		жовтий 0,63	0,25	2,5		
КИПД02Е			0,65			
КИПД05А	пластмасовий	червоний 0,7	0,2	1,8		6
КИПД05Б		зелений 0,55	0,1	2,5		
КИПД05В		жовтий 0,63				

Таблиця Б3 - Параметри арсенід галієвих світловипромінювальних діодів інфрачервоного спектру

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ											
Тип приладу	максимум спектрального розподілу, мкм	Потужність випромінювання, мВт		Пост. пр. напр., макс., В	Пост. зв. напр., макс., В	Пост. прямиї струм, макс., мА	Імпульсний прямиї струм, мкс., мА	t_u , мкс	Сквасність, Q	Тип корпусу	
Випромінювальні діоди ІЧ-діапазону в металоскляному корпусі											
АЛ106А	0,92-0,935	0,2		1,7		100				металоскляний	
АЛ106Б		0,4									
АЛ106В		0,6									
АЛ106Г		1,0									
АЛ106Д		1,5									
АЛ119А	0,93-0,96	40		3,0	2,0	300					
ЗЛ119А											
АЛ120А	0,88	0,8		2,0	1,0	55	200	40			
ЗЛ120А											
АЛ120Б		1,0									
ЗЛ120Б											
АЛ124А	0,86	4		2	2	110	1000	15	3		
ЗЛ124А											
ЗЛ130А	0,95	350 при $I_{np} = 3 A$ 200 при $I_{np} = 2 A$		3,0	1,0	3000				металокерамічний	
ЗЛ136А	0,81	0,6		2,0	5,0	60	80	20		металоскляний	
АЛ137А		0,22		3,0							
ЗЛ137А		0,5		2,4							
ЗЛ138А		0,4									
АЛ402А	0,69-0,7	0,05	10	При $I_{np} = 3 A$ $\tau_i = 50 нс$	-	-	12	3100	50	2000	металоскляний
АЛ402Б		0,025	5								
АЛ402В		0,015	3								

Випромінювальні діоди ІЧ-діапазону в пластмасовому корпусі										
АЛ107А	0,94-0,96	6,0	1,8	2	100	600	50	36	пластмасовий	
ЗЛ107А			2	6		1000	50	20		
АЛ107Б		10,0	1,8	2		600	50	36		
ЗЛ107Б			2	6		1000	50	20		
АЛ108А	0,94	1,5	1,35	2,0	110	10000	20	200		
ЗЛ108А						2,0	1,6	2000		20
АЛ108АМ		10000	20					200		
ЗЛ108А1										
АЛ115А	0,9-1,0	10	2,0	4,0	50					
ЗЛ115А										
АЛ118А	0,85-0,875	2	1,7	2	50	500	50	20		
ЗЛ118А	0,82-0,9									
ЗЛ129А	0,83-0,89	1,3 при $I_{np} = 50 \text{ мА}$ 5,0 при $I_{np} = 200 \text{ мА}$		2	1	100	250	32	4	
Діоди ІЧ-діапазону для оптичних ліній										
АЛ132А	1,26	10 мкВт	2,0	1,0	50	1000	15		металевий	
ЗЛ132А										
ЗЛ135А	0,82-0,9	150 мкВт	2,0	2,0	100	500	100	5		
Безкорпусні випромінювальні діоди ІЧ-діапазону										
АЛ103А	0,95	1,0	1,6	2,0	52				безкорпусні	
ЗЛ103А										
АЛ103Б		0,6		2,0						
ЗЛ103Б										
АЛ109А	0,94	0,2	1,2	22						
АЛ109А-1		0,4	1,7							
ЗЛ127А-1	0,75	0,06	2,0	4,0	15	100	10	20		
ЗЛ127А-5										
ЗЛ128А-1	0,86	1,0	1,8	2,0	25					
АЛ136А-5	0,82	0,6	1,9	5,0	60	80	20			
ЗЛ136А-5			2,0							

Таблиця Б4 - Фотодіоди та фотоприймальні модулі <https://zapadpribor.com/ua/category/fotopryyomni-prystroyi>

Параметр	ІФПМ1-10	ФП1-1300	ФП1-850	ФП-3
Область застосування	Виконаний на основі кремнієвого ріп фотодіода, призначений для використання в волоконо-оптичних системах зв'язку, гіроскопах, вимірювальній техніці та інших галузях в якості приймача та перетворювача оптичного випромінювання в електричний сигнал			волоконо-оптичні датчики, гіроскопи, оптичні прилади, медична техніка, наукові дослідження
Діапазон робочих довжин хвиль, нм	950-1620	950-1620	835	
Чутливість номінальної довжини хвилі при $\lambda=1300$ нм, А/Вт	0,7 при $\lambda=1300$ нм	0,7 при $\lambda=1300$ нм	Не менше 0,3 при $\lambda=835$ нм	Не менше 0,4
Спектральний діапазон, нм	1200-1620	1200-1620	600-900	600-900
Темновий струм, нА	Не більше 2 при U=10 В	0,5-5,0 при U=5 В	Не більше 5 при U=5 В	Не більше 1
Рівень зворотного відбиття входного оптичного сигналу, дБ	Не більше 50			
Ємність фотодіода, пФ	Не більше 0,25	5	Не більше 5	1
Час наростання, час спаду фронту імпульсу, нс		Не більше 3	Не більше 4	
Робоча смуга частот, ГГц	0,01-10			
Вихідний опір, Ом	50			
Напруга живлення, В	5	5	10	10
Діаметр світлочутливої області, мкм				100 або 600
Введення випромінювання в корпус через багатомодовий світлопровід з діаметром серцевини/оболонки, мкм		50/125		50/125
Довжина світлопроводу, мм				Не менше 10

Таблиця Б5 - Основні параметри кремнієвих фотодіодів

Тип фотодіода	Розмір чутливого елемента, мм	Основні параметри									
		$\Delta\lambda$, мкм	λ_{\max} , мкм	UP, В	IT, мКА не більше	SI інт, мА/лм (мКА/лК)	τ , с	Кфс, %	Опір ізоляції між корпусом і выводом, МОм	Маса, г	
ФДК-1	Ø1	0,5-1,1	0,8-0,9	20	3	3	10^{-5}	-	-	0,3	
ФДК-1В	Ø1			20	3	3				0,3	
ФД-3К	Ø1,13			15	0,5	3	$4 \cdot 10^{-6}$	100	0,8		
ФД-6К	1,9x1,9	0,4-1,1	0,82-0,86	20	1	$1,4 \cdot 10^{-2}$	10^{-5}		100	1,6	
ФД-7К	Ø10			27	5	$4,7 \cdot 10^{-1}$				50	10
ФД-8К	2x2	0,5-1,12	0,85-0,92	20	1	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$		200	1	
ФД-9К	4,4x4,4 або 5,6x5,6			10	10	3	$1,3 \cdot 10^{-5}$			100	1,6
ФД-10К	1,9x1,9			20	1	$4,4(0,7 \cdot 10^{-2})$	10^{-5}				2,0
ФД-10КП	Ø5			0,5-1,05	0,82-0,92	10	0,005				3
ФД-11К	Ø2,5	0,5-1,15	0,88-0,94	10	0,2	5	$5 \cdot 10^{-6}$	3,0			
ФД-17К	Ø10	0,55-1,1	0,85-0,92	15	10	$4,7 \cdot 10^{-1}$	10^{-5}	10			
ФД-18К	Ø10	0,47-1,1	0,85-0,92	27	5	6		10			
ФД-19КК	1x1(4)	0,5-1,1	0,75-0,8	3	0,1	4,2 (група А) 3,8 (група Б)	$3 \cdot 10^{-6}$	2	50	1,2	
ФД-20КП	2x2(4)	0,5-1,1	0,85-0,92	7	0,1	4	$5 \cdot 10^{-6}$	2	100	4	
ФД-20-30К	1,5x1,5(2)	0,5-1,1	0,85-0,95	5	0,1	0,3 А/Вт при $\lambda=0,9$ мкм	$1,8 \cdot 10^{-6}$	3	200	0,65	
ФД-20-31К	Ø1,4	0,47-1,17	0,78-0,82	20	0,1	4,0 (група А) 3,8 (група Б)	10^{-5}	-	100	0,8	
ФД-20-32К	2x1,35(2)	0,45-1,06	0,78-0,92	3	0,1	4	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,5		2	
ФД-20-33К	0,3x1,4 0,4x1,4 по 2 елемента	0,45-1,9	0,72-1,0	5	0,05	4,5 (0,25 А/Вт) при $\lambda=0,9$ мкм	$1,2 \cdot 10^{-7}$	10		2	
ФД-21-КП	Ø1,55	0,4-1,1	0,72-0,85	10	0,017	3,3	$6 \cdot 10^{-9}$	-		1	
ФД-22-КП	1x1(4)	0,45-1,1	0,75-0,9	7	0,05	4,4	10^{-6}	2		2	

ФД-23К	1,9x1,9	0,5-1,12	0,8-0,85	20	0,1	4,4(7·10 ⁻³)	10 ⁻⁵	-		2,0
ФД-24К	Ø10	0,47-1,12	0,75-0,85	27	2,5	6(4,7·10 ⁻¹)		-		10
ФД-25К	1,9x1,9	0,4-1,1	0,8-0,9	20	1	4·10 ⁻³	7,5·10 ⁻⁶	-	200	1
ФД-26К	1,9x1,9	0,4-1,1	0,8-0,95	20	3		1,2·10 ⁻⁵	-		1
ФД-27К	1,9x1,9	0,4-1,1	0,8-0,95	20	1	7,5·10 ⁻³	10 ⁻⁵	-	100	1
ФД-28КП	1,24x1,24	0,4-1,1	0,72-0,85	4	0,02	3,5 (0,2 А/Вт) при λ=0,63 мкм	1,6·10 ⁻⁷	-		5
ФД-К-142	Ø13,7	0,3-1,1	0,72-0,85	120	1,5	10	8·10 ⁻⁸	5	200	21
ФДК-155	Ø5	0,4-1,1	0,75-0,85	10	10	3,5	10 ⁻⁵		100	2
ФД-252	Ø0,6	0,4-1,1	0,76-0,88	24	0,01	0,35 А/Вт при λ=0,63 мкм	5·10 ⁻⁹		1000	3
ФД-246	12x0,3(12) та 0,3x0,4 (64)	0,5-1,1	0,75-0,9	0,2	1	3,5	10 ⁻⁵	5	100	15
ФД-252-0,1	Ø0,3	0,4-1,1	0,78-0,88	24	0,01	0,35 А/Вт при λ=0,63 мкм	2·10 ⁻⁹	-	1000	3
ФД-256	Ø1,37	0,4-1,1	0,75-0,9	10	0,005	6 (0,6 А/Вт) при λ=0,9 мкм		-		
ФД-265А	1,4x1,4	0,4x1,1	0,75-0,9	4	0,1	(7,5·10 ⁻³)	5·10 ⁻⁶	-	100	1
ФД-265Б				0	1	6·10 ⁻³		-		1

Таблиця Б6 - Основні параметри фоторезисторів <http://www.diagram.com.ua/list/spr-c69.shtml>

Фоторезистор	Розмір фото чутливого елементу, мм	Робоча напруга U_p , В не більше	Темновий опір R_T , МОм, не менше	Темновий струм I_T , мкА, не більше	Загальний струм I при $E = 200лк$, мА, не менше	Відношення темнового опору до світлового R_T / R_c , відн.од.	Максимальна потужність випромінювання P_{max} , мВт, не більше	Маса, г, не більше
<i>Сульфід кадмію</i>								
ФСК-2	4x7,5	50	3,3	40	0,4	10	100	10
ФСК-3	2x6	100	2,5	20	2	50	150	6
СФ2-1	0,5x1,5	15	15	1	0,5	500	50	1
СФ2-2	6x12	2	1	1	0,2($E = 300лк$)	200	10	2
ФПФ-7-1	3,7x2	6	1	6	0,4($E = 10лк$)	70	50	1
<i>Селенід кадмію</i>								
ФСД-1	4x7,2	20	2	10	1,5	150	50	3
СФ3-1	0,5x1,5	15	30	0,5	0,75	1500	10	0,5
СФ3-2	6x12	5	5	1	0,5	500	100	1
СФ3-3	10x10	10	10	0,3	0,3	1000	50	2
<i>Сульфід свинцю</i>								
ФСА-1	4x7,5	2...50	0,02...1	-	-	1,2	10	4,5
ФР1-3	1x5,8	15	0,047...0,33	-	-	-	6	5
ФР1-4	3x5,8	25	0,22...1	-	-	-	8	5
<i>Селенід свинцю</i>								
СФ4-1А	1x1	2,5...10	1	-	-	-	-	-
СФ4-1Б	1x1	2,5...5	0,6	-	-	-	-	-
СФ4-1В	1x1	2,5...10	0,4	-	-	-	-	-
СФ4-1Д	1x1	2,5...5	0,2	-	-	-	-	-

Таблиця Б7 - Основні світлові та електричні параметри і розміри ламп розжарювання для оптичних приладів

Тип лампи	Напруга, В	Потужність, Вт	Світловий потік, лм	лм/Вт Світловіддача,	Розміри ламп і тіла накалу, мм					
					Діаметр колби, D	Довжина лампи, L	Висота світлового центру, Н	Ширина (діаметр) тіла накалу, а	Висота тіла накалу, b	рисунок
ОП2,4-1,1	2,4	1,1А	28	-	18	33	-	-	-	а
ОП2,5-0,2	2,5	0,2	4	-	18	33	-	-	-	б
ОП3-0,25	3	0,25	3,2	-	4,6	14	11,5	0,23	2,3-0,6	е
ОП3-0,5	3	0,5	7	-	5,2	66	11	-	-	
ОП4-4-1	4	4	40	10	18	34	10,5	1,6x1,6	1,6	г
ОП4-4-2	4	4	40	-	18	34		1,2	1,2	г
ОП4,4-33	4,5	33	600		41	68	29			д
ОП6-3-В5	6	3	-		18	33	18,5			р
ОП6-3	6	3	18							
ОП6-15	6	15	225		19	55	37			ж
ОП6-15-1	6	15	180		21	56	43			з
ОП6-25	6	25	312	12,5	26	47	28	2,4	1,9	к
ОП6,3-0,22	6	0,22	8,5		12	24				с
ОП6,8-11,5	6,3	11,5	125		21	56	31			т
ОП7-10+10	7	0,5	40		13	31	18			ф
ОП8-0,6	8	0,6	57		15,5	28	-			ч
ОП8-3,2	8	3,2	29		12	24	-			ш
ОП8-9	8	9,0	84		18	33	14,6			л
ОП8-100	8	100	1600		60	110	44			м
ОП11-40	11	40	840		20	57	35			н
ОП12-100-1	12	100	2500		51	88	35			о
ОП12-100	12	100	2500		51	88	-			п
ОП13-15	13	15	63		15	58	14,5			н
ОП13-50	13	50	1500		20	57	-			к
ОПМТ26-15	26	15	142		20	42	23			ч
ОП33-0,3	33	0,3	130		26	90	55			ш
ОПТ127-0,1	127	0,1	75		5,4	224	-			э
ОПТ127-0,1-1	127	0,1	75		5,4	165	-			э

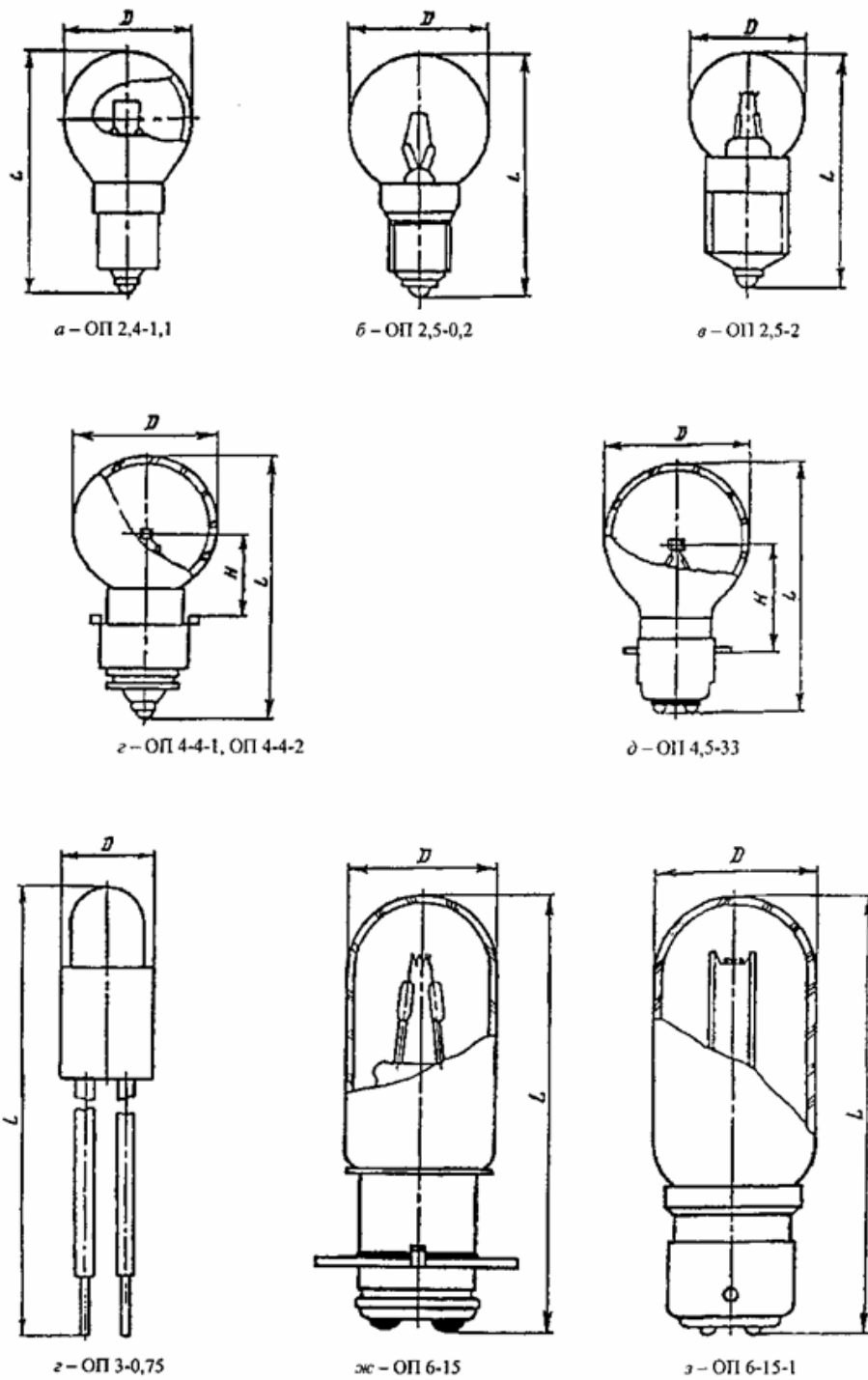
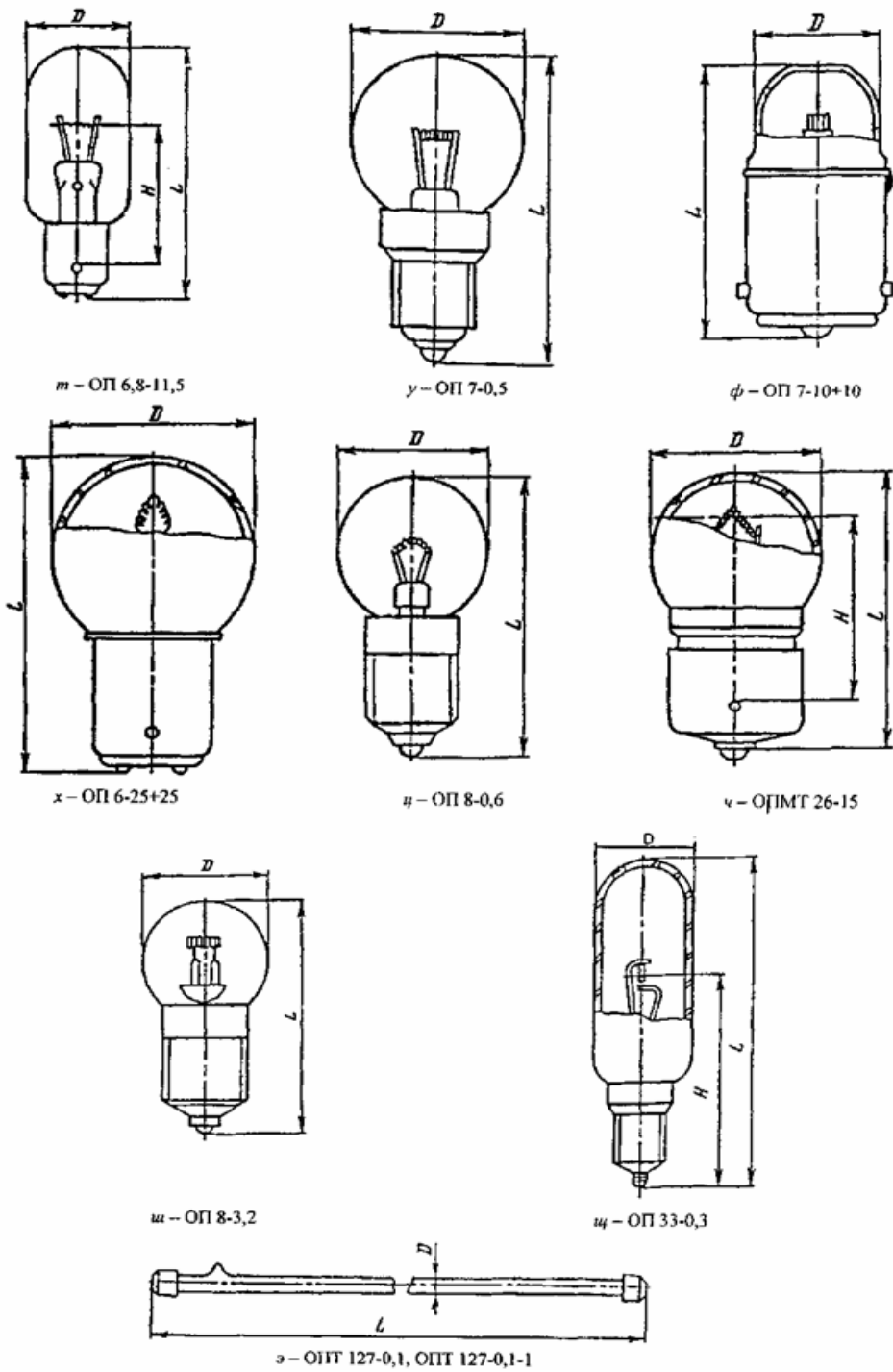
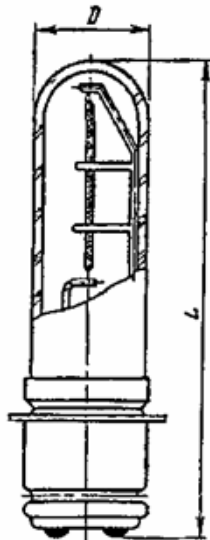


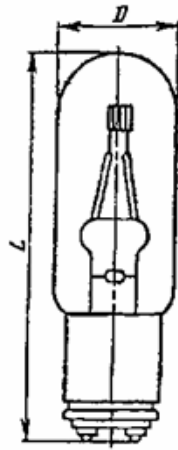
Рисунок Б7.1 - Геометричні розміри ламп розжарювання для оптичних приладів (до таблиці Б7)



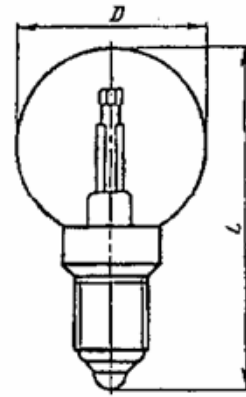
Продовження рисунка Б7.1 - Геометричні розміри ламп розжарювання для оптичних приладів (до таблиці Б7)



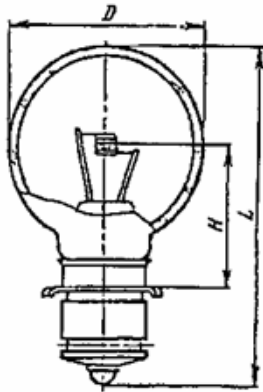
и – ОП 13-15



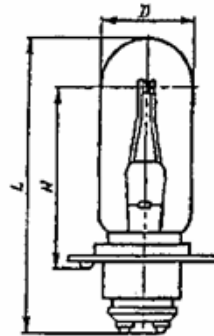
к – ОП 13-50



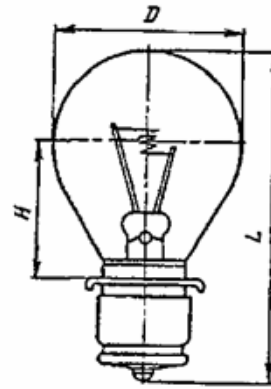
л – ОП 8-9



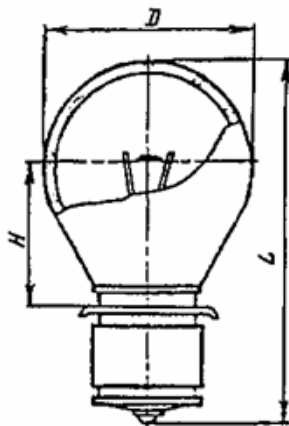
м – ОП 8-100



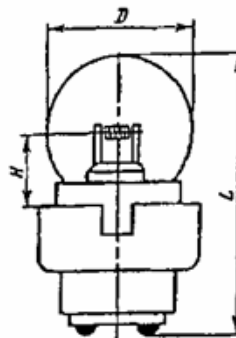
н – ОП 11-40



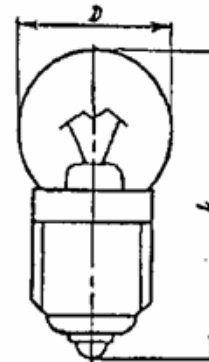
о – ОП 12-100-1



п – ОП 12-100



р – ОП 6-3-В5



с – ОП 6-3-0,22

Продовження рисунка Б7.1 - Геометричні розміри ламп розжарювання для оптичних приладів (до таблиці Б7)

Додаток Б8 - Технічні характеристики операційних підсилювачів

Параметр	Позначення	Од-ця	Тип мікросхеми						
			K140УД1А	K140УД1Б	K140УД1В	K140УД2А	K140УД2Б	K140УД5А	K140УД5Б
Вхідний струм	$I_{вх}$	нА	$7 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	≤ 700	≤ 700	$5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$
Різниця вхідних струмів	$\Delta I_{вх}$	нА	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	± 200	± 200	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Вхідний опір	$R_{вх}$	МОм	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	0.3	0.3	0,05	$3 \cdot 10^{-3}$
Напруга зміщення нуля	$U_{зм}$	мВ	9	9	9	± 10	± 10	± 10	± 5
Дрейф напруги зміщення нуля	$\Delta U_{зм} / \Delta T$	мкВ/°С	30	30	30	≤ 30	≤ 30	35	10
Коефіцієнт підсилення напруги	K_U	-	$\geq 0.5 \cdot 10^3$	$\geq 1.35 \cdot 10^3$	$\geq 8 \cdot 10^3$	$\geq 3.5 \cdot 10^3$	$\geq 3 \cdot 10^3$	≥ 500	$\geq 1 \cdot 10^3$
Коеф. ослаблення синфазних вх.напруг	$K_{ос.сф.}$	дБ	60	60	60	80	80	50	60
Частота одиночного підсилення	f_1	МГц	≥ 3	≥ 3	≥ 8	≥ 1	≥ 11	≥ 14	≥ 14
Швидкість наростання вихідної напруги	$V_{U_{вих}}$	В/мкс	0.2	0.4	0.4	0.12	0.12	6	6
Вихідний опір	$R_{вих}$	Ом	700	700	100	100	100	1000	1000
Максимальний вихідний струм	$I_{вих\ max}$	мА	3	3	3	13	13	-	-
Максимальна вихідна напруга	$U_{вих\ max}$	В	± 2.8	± 5.7	± 5.7	± 10	± 3	+6,5; -4,5	+6,58; -4,5
Максимальна вх.диференційна напруга	$U_{ор.\ вх\ max}$	В	± 1.5	± 1.5	± 1.5	± 4	± 1.5	± 3	± 3
Максимальна синфазна вх. напруга	$U_{сф.вх\ max}$	В	± 3	± 3	± 3	± 6	± 3	± 6	± 6
Напруга живлення	$U_{ж}$	В	± 6.3	± 12.6	± 12.6	± 12.6	± 6.3	$\pm 12,6$	$\pm 12,6$
Струм споживання	$I_{спож}$	мА	4.2	8	8	8	5	12	12
Дрейф струму	$\Delta I_{вх} / \Delta T$	нА/°С	25	25	25			$\pm 5\text{мА}$	$\pm 10\text{мА}$
опір навантаження	$R_{н}$	кОм	5	5	5	≥ 1	≥ 1	-	-

Продовження додатку Б8

Параметр	Позначення	Од-ця	Тип мікросхеми						
			K140УД6	K140УД7	K140УД8А	K140УД8Б	K140УД8В	K140УД9	K140УД10
Вхідний струм	$I_{вх}$	нА	100	400	0,2	0,1	0,2	350	500
Різниця вхідних струмів	$\Delta I_{вх}$	нА	±25	±200	±0,15	±0,15	±0,15	±100	±150
Вхідний опір	$R_{вх}$	МОм	1	0,4	1	1	1	0,3	0,4
Напруга зміщення нуля	$U_{3М}$	мВ	±10	±9	±50	±100	±150	±5	±4
Дрейф напруги зміщення нуля	$\Delta U_{3М} / \Delta T$	мкВ/°С	20	10	50	100	150	20	50
Коефіцієнт підсилення напруги	K_U	-	$\geq 3 \cdot 10^4$	$\geq 3 \cdot 10^4$	$\geq 5 \cdot 10^4$	$\geq 2 \cdot 10^4$	$\geq 1 \cdot 10^4$	$\geq 3,5 \cdot 10^4$	$\geq 5 \cdot 10^4$
Коеф. ослаблення синфазних вх.напруг	$K_{ос.сф}$	дБ	70	70	70	70	60	80	80
Частота одиничного підсилення	f_1	МГц	≥1	≥0,8	≥1	≥1	≥1	≥1	≥15
Швидкість наростання вихідної напруги	$V_{U_{вих}}$	В/мкс	2	0.3	2	5	2	0,5	20
Вихідний опір	$R_{вих}$	Ом	150	200	200	200	200	150	1000
Максимальний вихідний струм	$I_{вих\ max}$	мА	25	20	-	-	-	22	-
Максимальна вихідна напруга	$U_{вих\ max}$	В	±11	±10,5	±10	±10	±10	±10	-
Максимальна вх.диференційна напруга	$U_{ор.\ вх\ max}$	В	30	20	±6	±6	±6	±5	-
Максимальна синфазна вх. напруга	$U_{сфвх\ max}$	В	±15	±12	±10	±10	±10	±10	±12
Напруга живлення	$U_{ж}$	В	±15	±15	±15	±15	±15	±15	±15
Струм споживання	$I_{спож}$	мА	4	3,5	5	5	5	8	8
Дрейф струму	$\Delta I_{вх} / \Delta T$	нА/°С	0,1	-	-	-	-	-	-
опір навантаження	R_H	кОм	-	-	2	2	2	-	-

Продовження додатку Б8

Параметр	Позначення	Од-ця	Тип мікросхеми						
			K140УД11	K140УД12	K140УД13	K140УД14А	K140УД14Б	K140У14В	K153УД1А
Вхідний струм	$I_{вх}$	нА	500	50	0,5	2	2	2	1500
Різниця вхідних струмів	$\Delta I_{вх}$	нА	±200	±15	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±500
Вхідний опір	$R_{вх}$	МОм	0,4	5	50	30	30	30	0,2
Напруга зміщення нуля	$U_{зм}$	мВ	±10	±7,5	±0,05	±2	±2	±2	±7,5
Дрейф напруги зміщення нуля	$\Delta U_{зм} / \Delta T$	мкВ/°С	50	3	0,5	15	20	30	30
Коефіцієнт підсилення напруги	K_U	-	$\geq 2,5 \cdot 10^4$	$\geq 5 \cdot 10^4$	≥ 10	$\geq 5 \cdot 10^4$	$\geq 5 \cdot 10^4$	$\geq 2 \cdot 10^4$	$\geq 1,5 \cdot 10^4$
Коеф. ослаблення синфазних вх.напруг	$K_{ос.сф.}$	дБ	70	70	90	85	85	85	65
Частота одиничного підсилення	f_1	МГц	≥15	≥0,3-1	≥0,006	≥0,5	≥0,5	≥0,5	≥1
Швидкість наростання вихідної напруги	$V_{U_{вих}}$	В/мкс	+50; -20	0.8	-	-	-	-	-
Вихідний опір	$R_{вих}$	Ом	-	$(1-5) \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	-	-	-	200
Максимальний вихідний струм	$I_{вих\ max}$	мА	-	10	-	-	-	-	5
Максимальна вихідна напруга	$U_{вих\ max}$	В	±12	±1...±10	±1	±10	±10	±10	±10
Максимальна вх.диференційна напруга	$U_{ор.\ вх\ max}$	В	±4	±1...±10	±10	±13,5	±13,5	±13,5	±5
Максимальна синфазна вх. напруга	$U_{сф.вх\ max}$	В	±6	±2...±12	±10	±6	±6	±6	±8
Напруга живлення	$U_{ж}$	В	±5...±18	±3...±18	±15	±15	±15	±15	±15
Струм споживання	$I_{спож}$	мА	10	0,23	2	0,6	0,6	0,6	6
Дрейф струму	$\Delta I_{вх} / \Delta T$	нА/°С	-	-	-	-	-	-	-
опір навантаження	R_H	кОм	2	5	-	-	-	-	-

Продовження додатку Б8

Параметр	Позначення	Од-ця	Тип мікросхеми						
			K153УД1Б	K153УД2	K153УД3	K153УД4	K153УД5А	K153УД5Б	K153УД6
Вхідний струм	$I_{вх}$	нА	2000	1500	200	400	100	100	75
Різниця вхідних струмів	$\Delta I_{вх}$	нА	±600	±500	±50	±150	±20	±20	±10
Вхідний опір	$R_{вх}$	МОм	0,2	0,3	0,4	0,2	1	1	0,3
Напруга зміщення нуля	$U_{зм}$	мВ	±7,5	±7,5	±2	±5	±2,5	±2,5	±20
Дрейф напруги зміщення нуля	$\Delta U_{зм} / \Delta T$	мкВ/°С	30	30	15	50	5	10	15
Коефіцієнт підсилення напруги	K_U	-	$\geq 1 \cdot 10^4$	$\geq 2,5 \cdot 10^4$	$\geq 2,5 \cdot 10^4$	$\geq 5 \cdot 10^3$	$\geq 1,25 \cdot 10^5$	$\geq 1 \cdot 10^5$	$\geq 5 \cdot 10^4$
Коеф. ослаблення синфазних вх.напруг	$K_{ос.сф.}$	дБ	65	70	80	70	110	100	80
Частота одиничного підсилення	f_1	МГц	≥1	≥1	≥1	≥1	≥0,3	≥0,3	≥0,7
Швидкість наростання вихідної напруги	$V_{U_{вих}}$	В/мкс	-	0.5	-	0,1	-	-	-
Вихідний опір	$R_{вих}$	Ом	200	300	200	1000	150	150	200
Максимальний вихідний струм	$I_{вих\ max}$	мА	5	-	-	-	5	-	-
Максимальна вихідна напруга	$U_{вих\ max}$	В	±9	±10	±11	±4	±10	±10	±10
Максимальна вх.диференційна напруга	$U_{ор.\ вх\ max}$	В	±5	30	±5	±2	±5	±5	30
Максимальна синфазна вх. напруга	$U_{сф.вх\ max}$	В	±8	±12	±8	±5	±13,5	±13,5	±12
Напруга живлення	$U_{ж}$	В	±15	±15	±15	±6,3	±15	±15	±15
Струм споживання	$I_{спож}$	мА	6	3	3,6	0,8	3,5	3,5	3
Дрейф струму	$\Delta I_{вх} / \Delta T$	нА/°С	-	-	-	-	-	-	-
опір навантаження	R_H	кОм	-	2	2	-	-	-	-

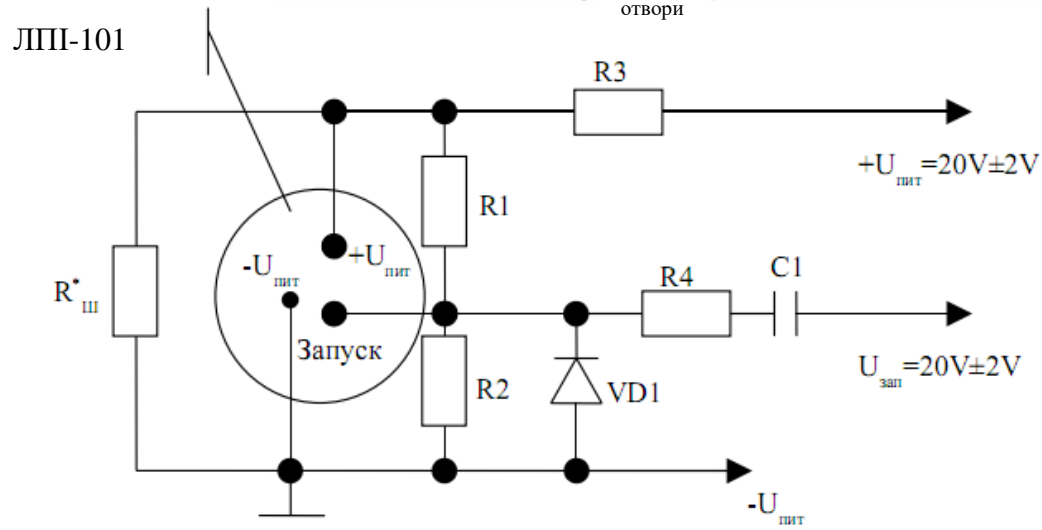
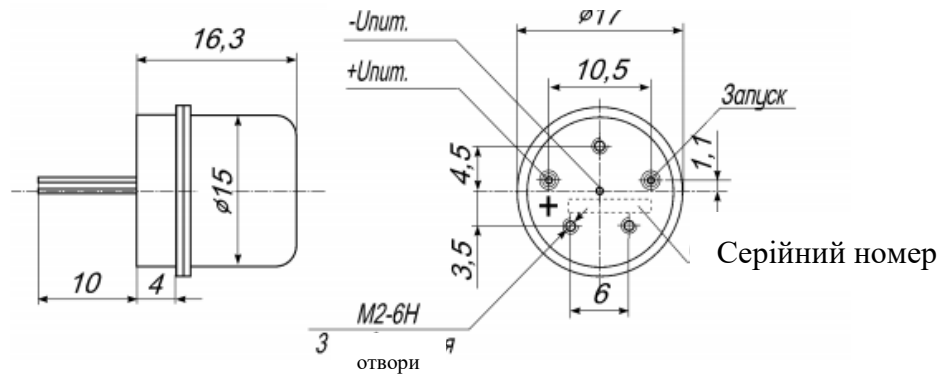
Додаток В Технічні характеристики деяких моделей технологічних твердотільних лазерів

Таблиця В1 - Напівпровідникові інжекційні багатомодові лазери імпульсного режиму роботи <https://www.ebay.com/itm/145013351962>

Використовуються в якості джерел лазерного випромінювання. Виконані на арсенід-галієвому діоді, мають вбудований генератор струму накачки. Виконані в герметичному скляному корпусі з виводом випромінювання крізь скляне вікно.

Найменування параметру, одиниця вимірювання	Тип лазера					
	ЛПІ-101	ЛПІ -102	ЛПІ -108	ЛПІ -120	ЛПІ -120-2	ЛПІ -121
Довжина хвилі випромінювання, нм	875±75	875±75	880±30	875±25	875±75	875±25
Середня потужність імпульсу лазерного випромінювання, Вт, не менше	3	2,5	8	15	4	6
Тривалість імпульсів лазерного випромінювання, нс, не менше	70	70	60	50	60	60-200
Частота повтору імпульсів ЛВ, кГц	6,0±0,6		12±0,1	3	6,0±0,6	12±0,1
Струм споживання, мА, не більше	50		100	150	150	30-120
Напруга живлення, В	20±0,1			24±0,1	20±0,1	18±0,1
Діапазон робочих температур, °С	-60...+60		-10...+40	-60...+60	-10...+40	-60...+60

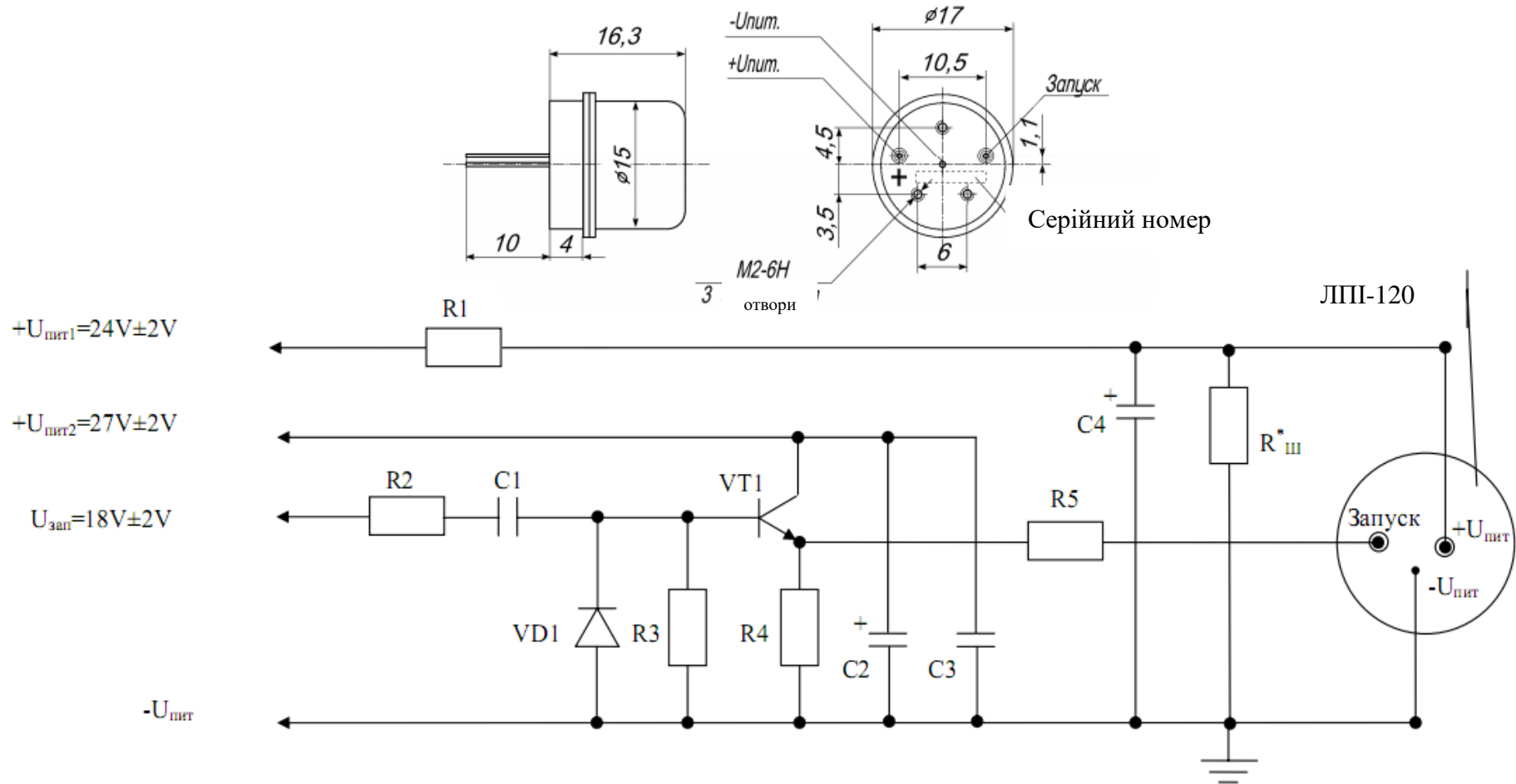
Схема підключення ЛПІ-101



$R1 - 9,1 \text{ k}\Omega$ $R2 - 9,1 \text{ k}\Omega$
 $R3 - 200 \text{ }\Omega$ $R4 - 51 \text{ }\Omega$

$R_{\text{ш}}^*$ - шунтувальний резистор, змінна величина індивідуальна для кожного лазера, що забезпечує заявлену в паспорті вихідну потужність лазерного випромінювання. Вказується в паспорті лазера з індивідуальним номером. Діапазон $R_{\text{ш}}^* = 0,91 - 100 \text{ k}\Omega$. $C1 - 2200 \text{ pF}$

Схема підключення ЛПІ-120



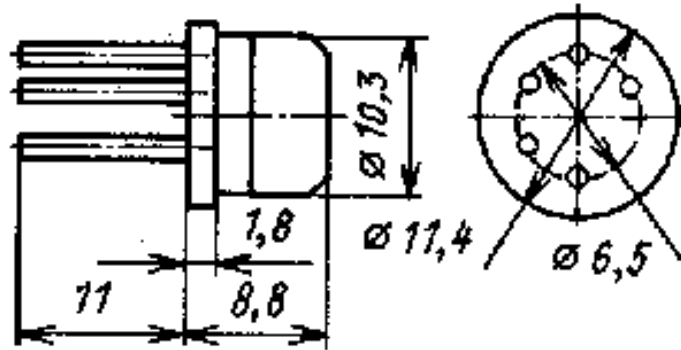
$R1 - 51 \text{ Ом}; R1 - 51 \text{ Ом}; R3 - 2 \text{ kОм}; R4 - 1 \text{ kОм}; R5 - 82,5 \text{ Ом}$

$R_{ш}^*$ - шунтувальний резистор, змінна величина індивідуальна для кожного лазера, що забезпечує заявлену в паспорті вихідну потужність лазерного випромінювання. Вказується в паспорті лазера з індивідуальним номером. Діапазон $R_{ш}^* = 0,91-100 \text{ kОм}$. $C1-2200 \text{ pF}$

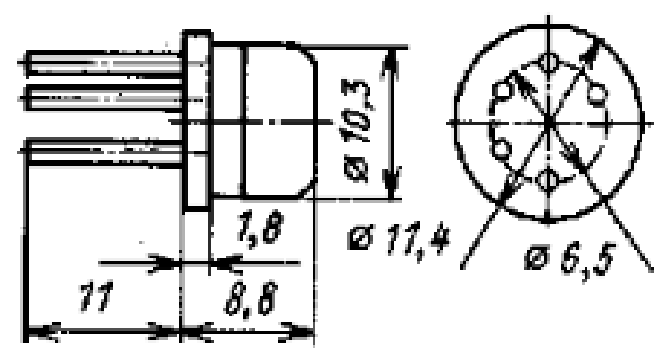
Таблиця В2 - Напівпровідникові інжекційні багатомодові лазери неперервного режиму роботи

Параметр	Інжекційні багатомодові лазери неперервного режиму роботи				Інжекційні одномодові лазерні випромінювачі неперервного режиму роботи				
	Тип випромінювача								
	ІЛПН-108	ІЛПН-114	ІЛПН-115	ІЛПН-117	ІЛПН-203	ІЛПН-203А	ІЛПН-203Б	ІЛПН-203В	ІЛПН-206
Довжина хвилі, нм	845±35	830±10 860±20	850±40	850±30	845±35				1275±55
Середня потужність імпульсу ЛВ, Вт не менше	40	200	30 При діаметрі світлового спряження 100 мкм і вихідній апертурі 0,2	120 На виході волоконно-оптичного кабелю з діаметром сердцевини 400 мкм і вихідною числовою апертурою 0,2	3,5 мВт				1 мВт
Струм накачки, мА, не більше	300	600	350	700	40-100				Не більше 120
Напруга на ЛД, В, не більше	2,4	2,5	2,4	2,5	1,5-2,3				2,5
Струм вбудованого фотодіода, мкА, не менше	100				200				60
Діапазон робочих температур, °С	Від 3 до 35	Від -30 до +40	Від 3 до 35	Від -30 до +40	-60 до +60				
Мінімальне напрацювання, годин	5000	500, 1000	500	500	50000	50000	10000	2000	50000

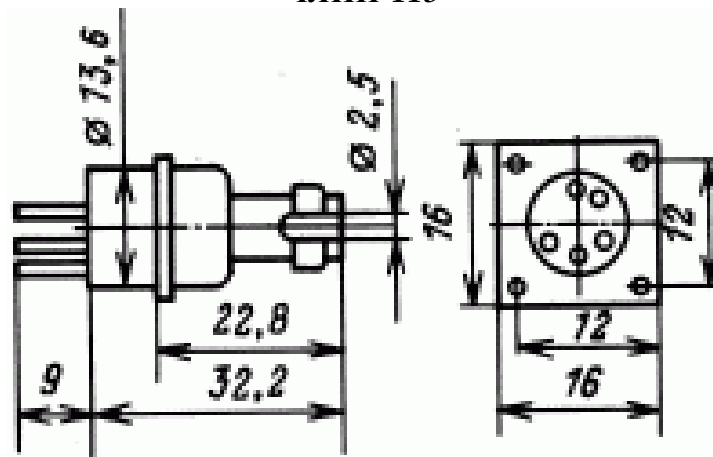
ЛПН-114



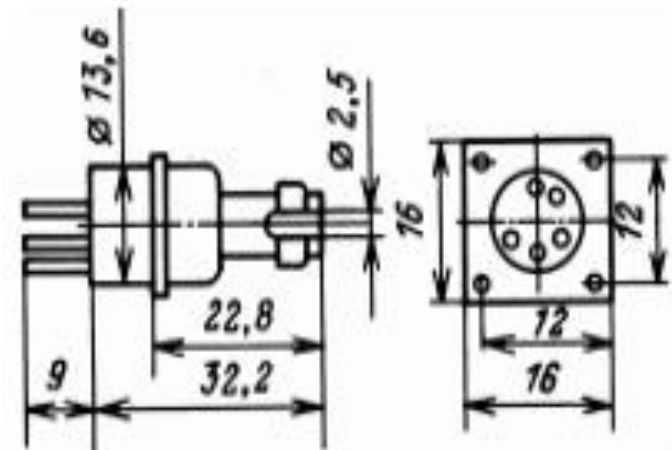
ЛПН-203



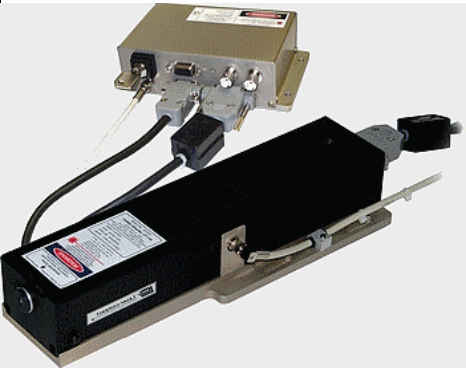
ЛПН-115



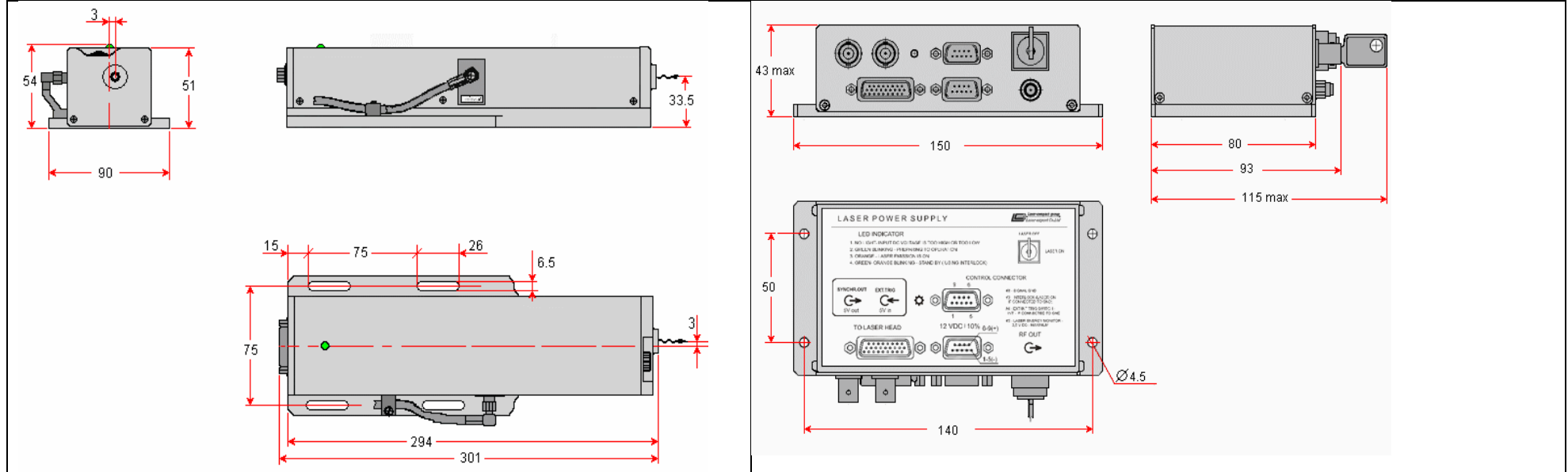
ЛПН-206-1

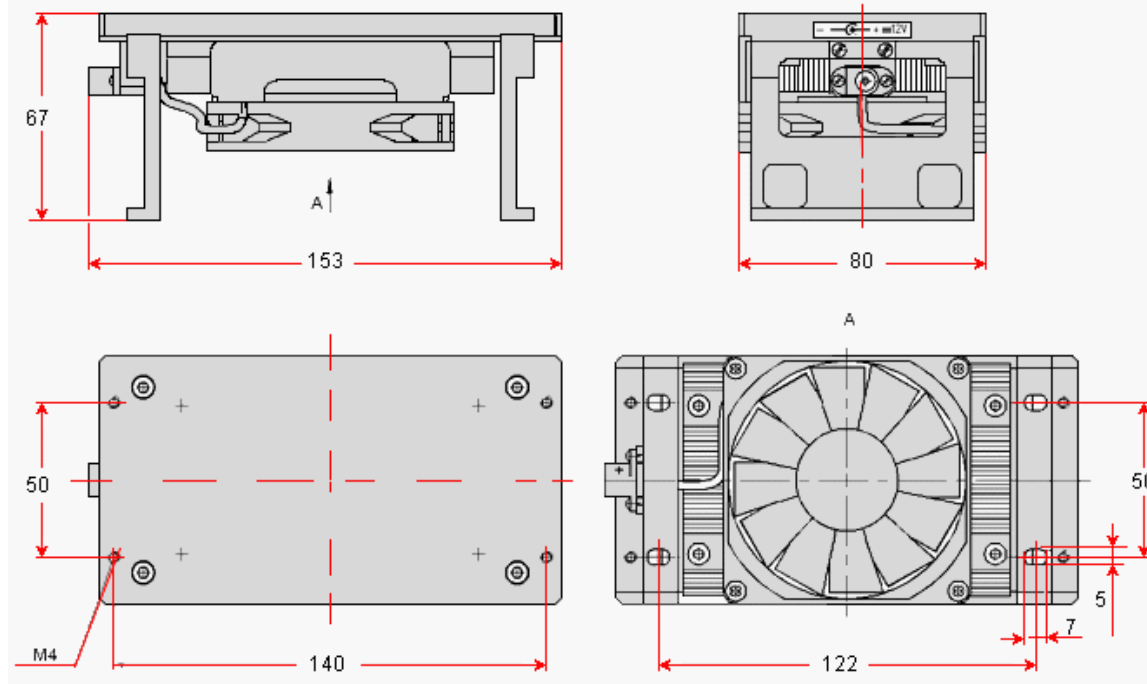
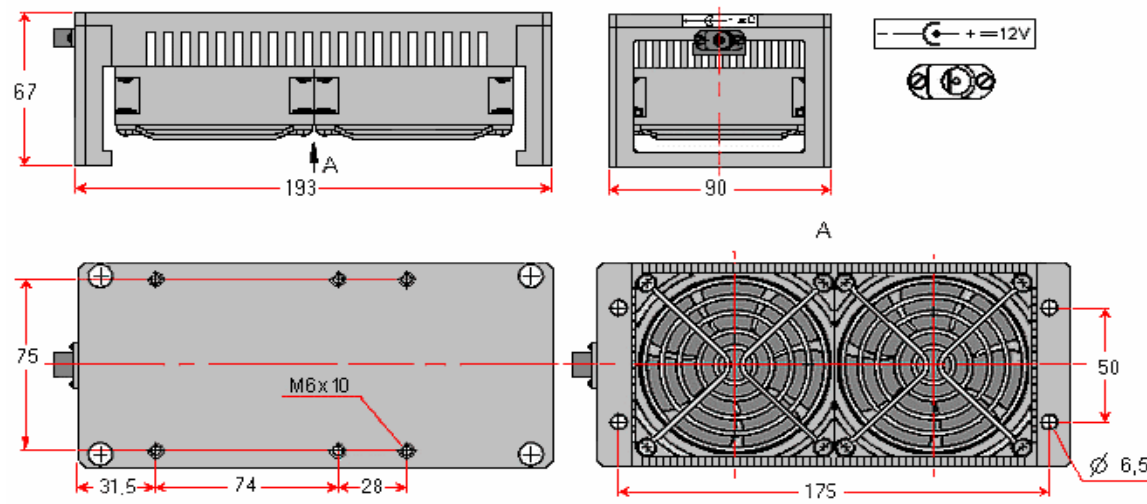


Таблиця В3 - Неодимові твердотільні лазери з діодною накачкою (DPSS) <https://wavelength-oe.com/uk/dpss-lasers/>,
<https://seltokphotonics.com/catalog>

	Модель DTL-392QT		Модель DTL-394QT			Модель DTL-399QT			
	Застосування: різноманітні види спектроскопії, лазерна мікроскопія, наукові дослідження, контрольовано-вимірювальне обладнання, неруйнівні дослідження								
	фотоакустика, мікрообробка матеріалів								
Довжина хвилі, нм	527	1053	263	527	1053	351	527	1053	
Середня енергія в імпульсі на частоті 1 кГц, мкДж	≥150		≥10	≥150	≥150	≥50	≥40	≥80	
Максимальна середня вихідна потужність, мВт	≥350 на f=5 кГц	≥800 на f=50 кГц	≥18 на f=3 кГц	≥350 на f=5 кГц	≥800 на f=5 кГц	≥100 на f=3 кГц	≥100 на f=5 кГц	≥800 на f=50 кГц	
Режим роботи	Імпульсний, з акустооптичною модуляцією добротності, з запуском зовнішнім/внутрішнім/через RS-232								
Діапазон частот повтору імпульсів, кГц <ul style="list-style-type: none"> • Зовнішній запуск • Внутрішній запуск 	0-50 0,01-30	0-100 0,01-30	0-10 0,01-10	0-50 0,01-30	0-100 0,01-30	0-30 0,01-30	0-50 0,01-30	0-100 0,01-30	
Тривалість імпульсу, нс <ul style="list-style-type: none"> • 1 кГц • 5 кГц • 10 кГц • 30 кГц • 50 кГц • 100 кГц 	9 14 17 50 80 -	10 17 25 70 120 170	5 10 12 - - -	9 14 17 50 80 -	10 17 25 70 120 170	9 11 40	9 13 50 80	16 20 60 100 200	
Нестабільність затримки між лазерним імпульсом і вихідним синхроімпульсом, нс	≤ ±1								

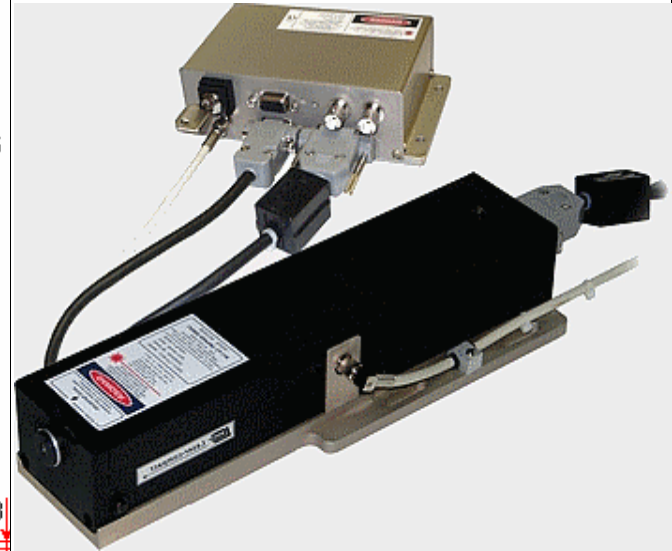
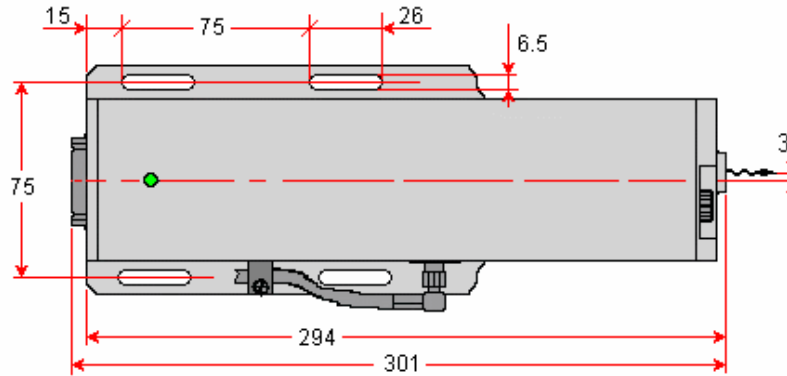
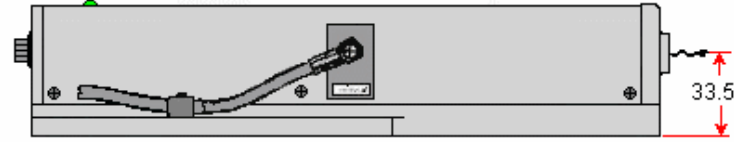
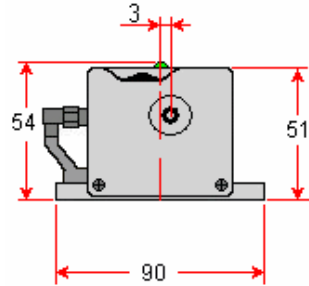
Профіль пучка	TEM ₀₀						
Діаметр пучка на вихідній апертурі (за рівнем $1/e^2$), мм	0,7	1	0,5	0,7	1	1,2	-
Розхідність лазерного променя (повний кут, за рівнем $1/e^2$), мрад	≤3	≤4	≤2	≤3	≤4	≤1	-
Лінійність поляризації	≥100:1						
	Горизонт.	Вертик.	Горизонт.	Вертикальна	Вертик.	Горизон.	Вертик.
Напруга живлення, В	~90-264						
Час готовності, хв.	10						





Модель DTL-329QT	Неруйнівний контроль, контроль-вимірвальне обладнання, наукові дослідження, лазерне маркування	
Довжина хвилі, нм	1053 (Nd:YLF)	
Середня енергія в імпульсі на частоті: <ul style="list-style-type: none"> • 0,01-1 кГц, мкДж • Від одиночних імпульсів до 0,01 кГц, мкДж 	200±15 % 200±25 %	300±15 % 300±25 %
Режим роботи	Імпульсний, з акустооптичною модуляцією добротності, з запуском зовнішнім/внутрішнім/через RS-232	
Діапазон частот повтору імпульсів, кГц <ul style="list-style-type: none"> • Зовнішній запуск • Внутрішній запуск, через RS-232 • Без підключення до ПК 	одиначн. імпульс -100 0,01-30 1	
Тривалість імпульсу (на напіввисоті, на 0,01-1 кГц, при середній енергії імпульсу ε80%), нс	7±3	
Нестабільність енергії – середнє квадратичне відхилення / середнє (0,01 – 1 кГц)	δ2 % (δ 1%)	
Профіль пучка	Гаусів, TEM ₀₀	
Діаметр пучка на вихідній апертурі (за рівнем $1/e^2$), мм	2,3±0,5	
Розходження лазерного променя (повний кут, за рівнем $1/e^2$), мрад	0,4±0,1	
Лінійність поляризації	ε100:1, горизонтальна (±5 °)	
Затримка між запускаючим імпульсом і вихідним синхроімпульсом (0,01-0,1 кГц, при середній енергії в імпульсі ε80%), нс <ul style="list-style-type: none"> • Час затримки • Нестабільність затримки 	300±250 δ8	
Затримка між лазерним імпульсом і вихідним синхроімпульсом (0,01-0,1 кГц, при середній енергії в імпульсі ε80%), нс <ul style="list-style-type: none"> • Час затримки • Нестабільність затримки 	δ50 δ2	
Напруга живлення, В	~90-264	

Вживаний струм, А	86
Час готовності, хв.	10
Управління параметрами лазера (внутрішня/зовнішня, синхронізація, викл. вкл., частота та енергія імпульсів)	Через RS-232
Швидкість обміну через інтерфейс RS-232, біт/с	4800



Л8І

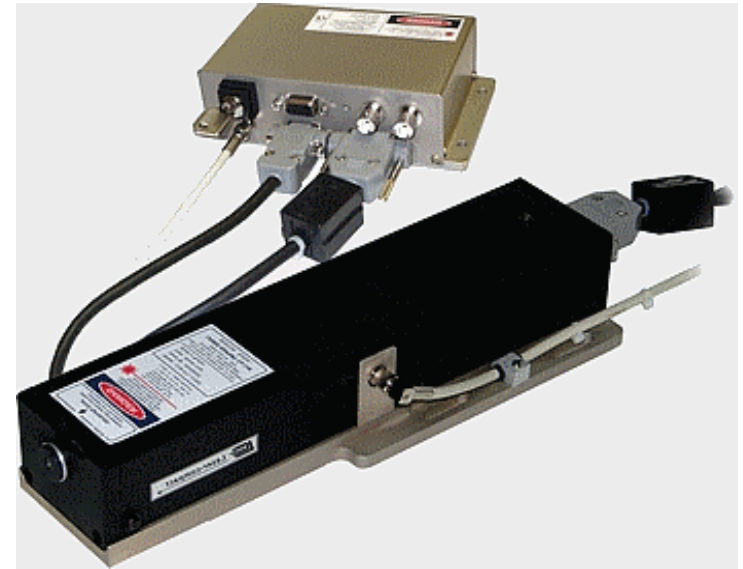
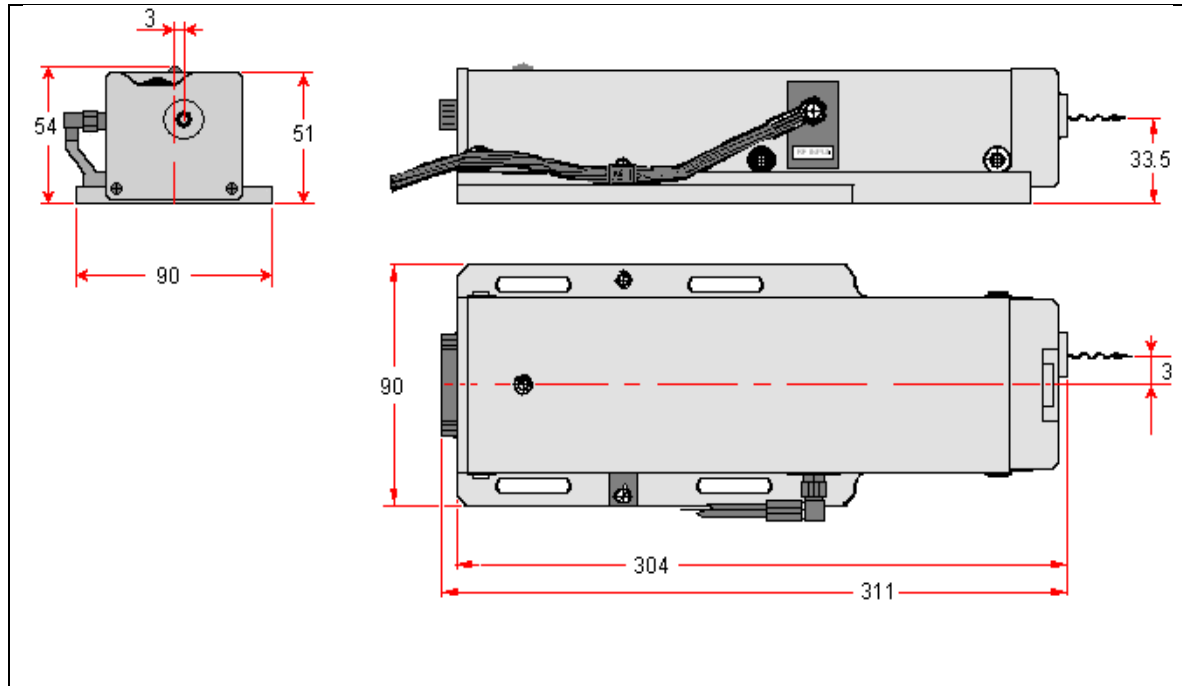
Модель DTL-382QT	Застосування: наукові дослідження, біотехнології, моніторинг оточуючого середовища, флуорисценція.
Довжина хвилі, нм	266 (Nd: скло)
Середня енергія в імпульсі на частоті: • 0,01-1 кГц, мкДж	4±15 %

<ul style="list-style-type: none"> Від одиночних імпульсів до 0,01 кГц, мкДж 	4±25 %
Максимальна середня вихідна потужність (типово на 3 кГц), мВт	≥5
Режим роботи	Імпульсний, з акустооптичною модуляцією добротності, з запуском зовнішнім/внутрішнім/через RS-232
Діапазон частот повтору імпульсів, кГц <ul style="list-style-type: none"> Зовнішній запуск Внутрішній запуск, через RS-232 Без підключення до ПК 	Одиноч. імпульс -10 0,01-10 1
Тривалість імпульсу (на 0,01-1 кГц, при середній енергії імпульсу ≥3 мкДж), нс	5±2
Нестабільність енергії – середнє квадратичне відхилення / середнє (0,01 – 1 кГц)	≤15 % (≤ 12%)
Профіль пучка	Гаусів, TEM ₀₀
Діаметр пучка на вихідній апертурі (за рівнем $1/e^2$), мм	1,0
Розходження лазерного променя (повний кут, за рівнем $1/e^2$), мрад	≤0,6
Лінійність поляризації	≥100:1, горизонтальна (±5 °)
Затримка між запускаючим імпульсом і вихідним синхроімпульсом (0,01–0,1 кГц, при середній енергії в імпульсі ≥3 мкДж), нс <ul style="list-style-type: none"> Час затримки Нестабільність затримки 	300±250 ≤8
Затримка між лазерним імпульсом і вихідним синхроімпульсом (0,01–0,1 кГц, при середній енергії в імпульсі ≥3 мкДж), нс <ul style="list-style-type: none"> Час затримки Нестабільність затримки 	≤50 ≤2
Напруга живлення, В	~90-264
Вживаний струм, А	≤6
Час готовності, хв.	10
Управління параметрами лазера (внутрішня/зовнішня, синхронізація, викл.вкл., частота та енергія імпульсів	Через RS-232

Швидкість обміну через інтерфейс RS-232, біт/с	4800
Клас лазерної безпеки	IV

Модель DTL-319QT	Застосування: контрольно-вимірювальне обладнання, наукові дослідження, лазерне маркування, контроль якості продукції		
Довжина хвилі, нм	527 (Nd: скло)		
Середня енергія в імпульсі на частоті:			
<ul style="list-style-type: none"> ● 0,01-1 кГц, мкДж ● Від одиночних імпульсів до 0,01 кГц, мкДж 	60±15 %	100±15 %	200±15 %
	60±25 %	100±25 %	200±25 %
Максимальна середня вихідна потужність (типово на 3 кГц)	≥120	≥200	≥350
Режим роботи	Імпульсний, з акустооптичною модуляцією добротності, з запуском зовнішнім/внутрішнім/через RS-232		

Діапазон частот повтору імпульсів, кГц <ul style="list-style-type: none"> • Зовнішній запуск • Внутрішній запуск, через RS-232 • Без підключення до ПК 	одиночн. імпульс -10 0,01-10 1	одиночн. імпульс -30 0,01-30 1
Тривалість імпульсу (на 0,01-1 кГц, при середній енергії імпульсу $\geq 80\%$, FWHM), нс	7±3	
Нестабільність енергії – середнє квадратичне відхилення / середнє (0,01 - 1 кГц)	$\leq 6\%$ ($\leq 5\%$)	
Профіль пучка	Гаусів, TEM ₀₀	
Діаметр пучка на вихідній апертурі (за рівнем $1/e^2$), мм	2,0±0,6	
Розходження лазерного променя (повний кут, за рівнем $1/e^2$), мрад	0,8±0,4	
Лінійність поляризації	$\geq 100:1$, горизонтальна ($\pm 5^\circ$)	
Затримка між запускаючим імпульсом і вихідним синхроімпульсом (0,01–0,1 кГц, при середній енергії в імпульсі $\geq 80\%$), нс <ul style="list-style-type: none"> • Час затримки • Нестабільність затримки 	$\leq 300 \pm 50$ ≤ 8	
Затримка між лазерним імпульсом і вихідним синхроімпульсом (0,01–0,1 кГц, при середній енергії в імпульсі $\geq 80\%$), нс <ul style="list-style-type: none"> • Час затримки • Нестабільність затримки 	≤ 50 ≤ 2	
Напруга живлення, В	~90-264	
Вживаний струм, А	≤ 6	
Час готовності, хв.	10	
Управління параметрами лазера (внутрішня/зовнішня, синхронізація, викл.вкл., частота та енергія імпульсів)	Через RS-232	
Швидкість обміну через інтерфейс RS-232, біт/с	4800	
Клас лазерної безпеки	IV	



Модель LCS-T-111

Застосування: контрольно-вимірювальне обладнання, медичне обладнання, наукові дослідження, контроль якості продукції, оптичний пінцет

Довжина хвилі випромінювання, нм	1064 (Nd: скло)		
Вихідна потужність, мВт	300	1000	2000
Режим накачки	неперервний		
Тип моди	TEM ₀₀		
Рівень оптичних шумів в частотному діапазоні 10 Гц - 20 МГц, % RMS	<0.5		
Діаметр пучка на виході, мм	1,0±0,2		
Діапазон регулювання потужності (від номінального значення)	10-100 %		
Параметр якості пучка лазерного випромінювання, M ²	<1.2	<1.3	
Лінійність поляризації	>100:1, лінійна, горизонтальна		
Ширина лінії, нм	0,2		

Стабільність потужності при постійній температурі корпусу	<2% за 8 годин	
Робоча температура, °C	15-35	
Клас лазерної безпеки	3a	3b

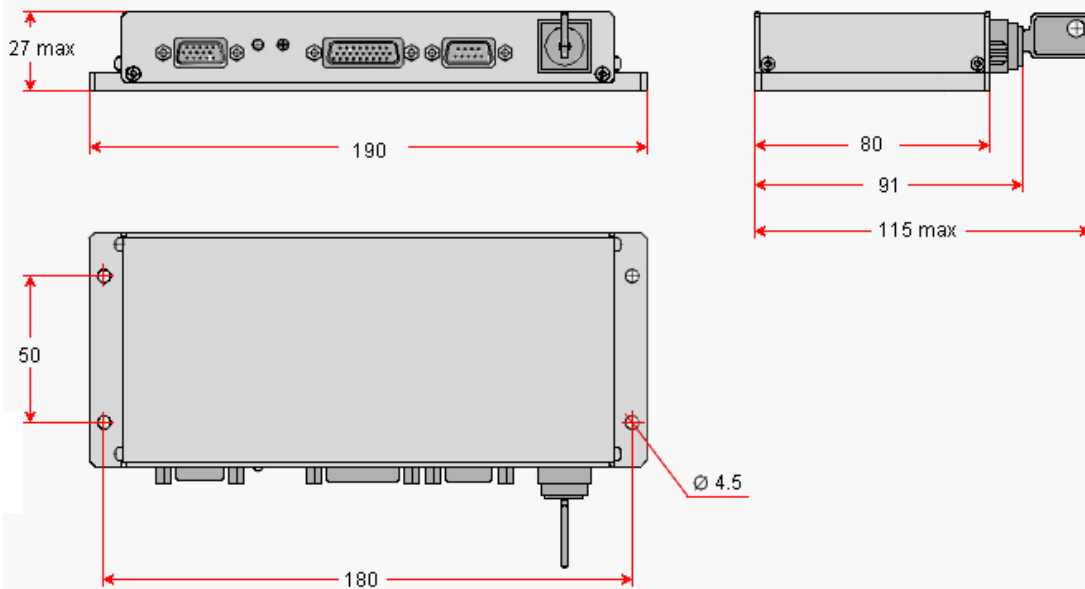
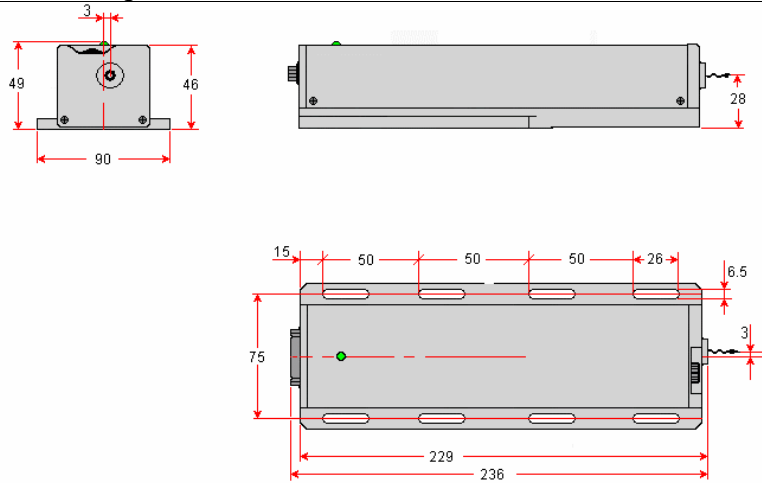


Рисунок В1 - Блок живлення неперервних лазерів DTL - серії

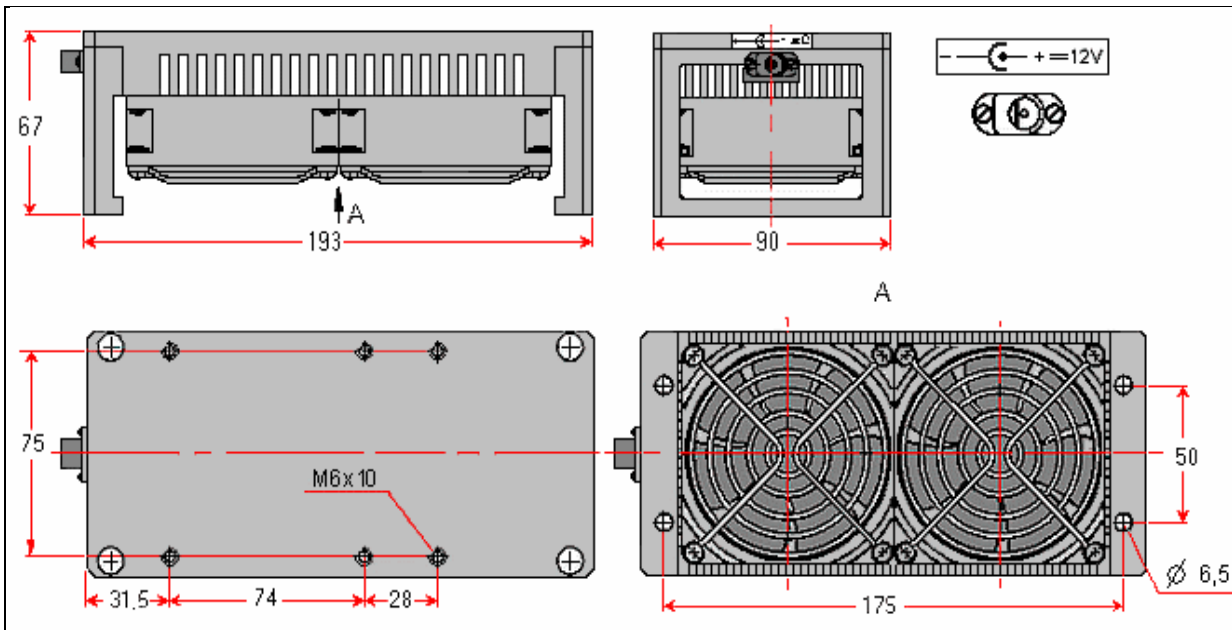
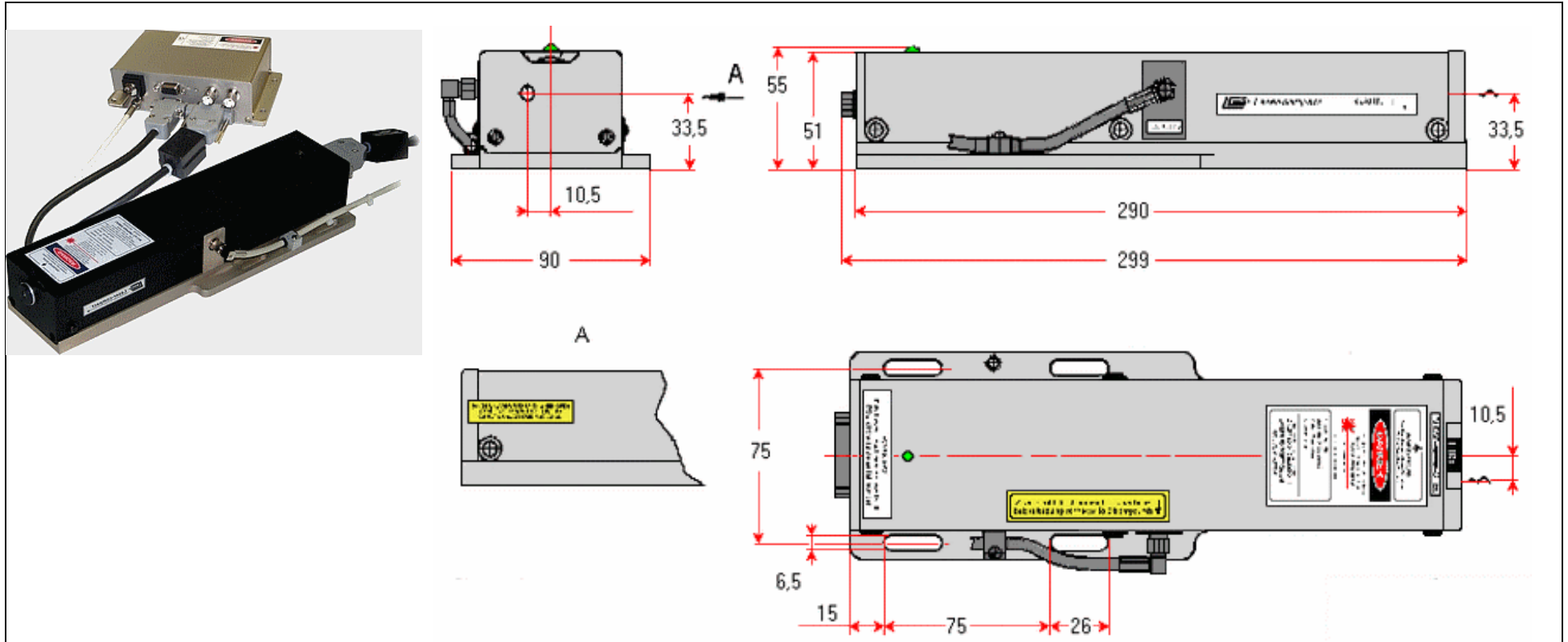


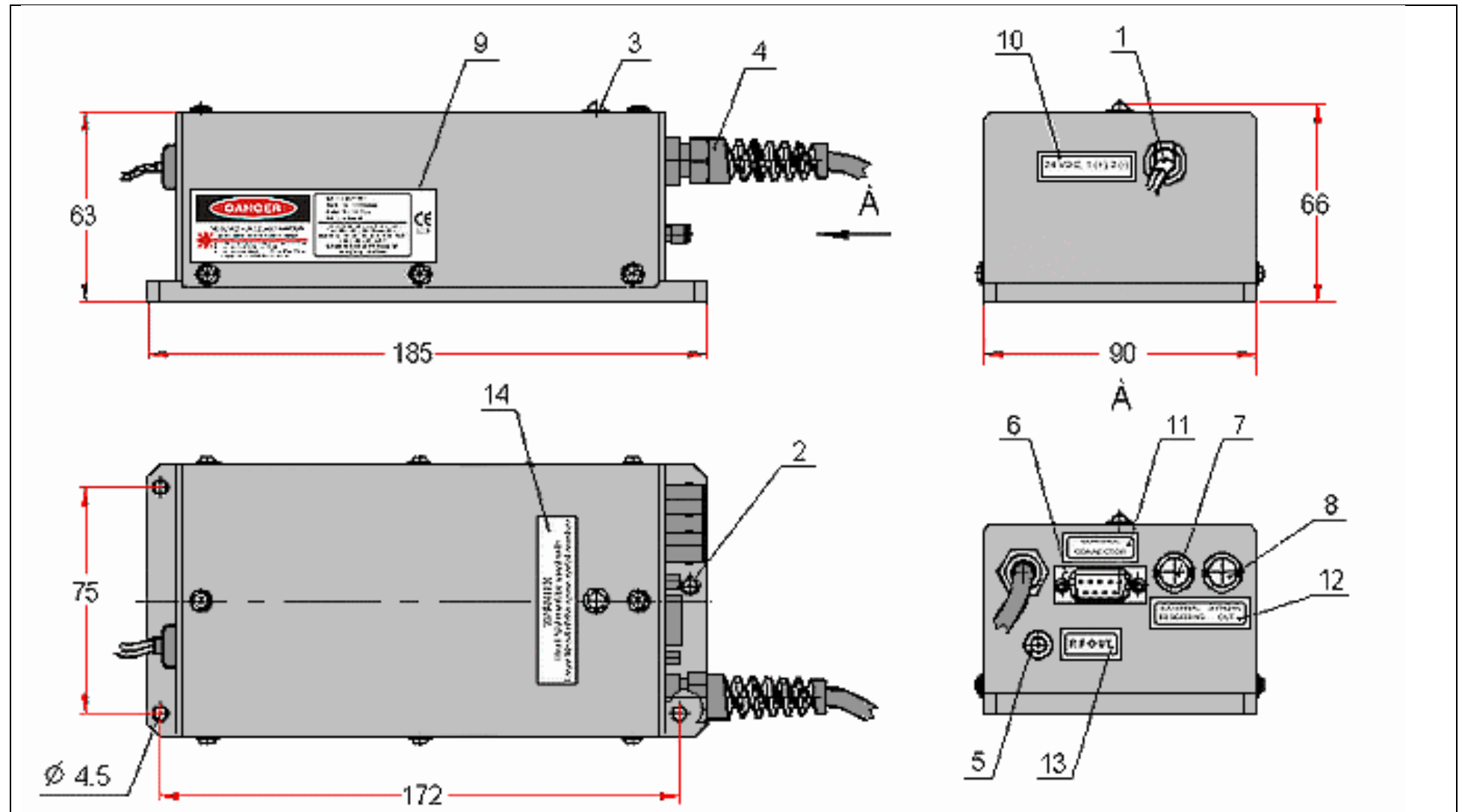
Рисунок В2 - Пристрій зовнішнього охолодження

<p align="center">Модель «гранат»</p>	<p>Застосування: мас-спектрометрія (в тому числі MALDI TOF), лазерна мікродисекція, біотехнологія, наукові дослідження</p>
Довжина хвилі випромінювання, нм	355 (Nd: скло)
Гасіння інших довжин хвиль (532/1064 нм)% від УФ	0,1
Діапазон частоти повтору імпульсів, Гц Зовнішня синхронізація	200-2000 Генерація лазера на частотах, менших 200 Гц, заборонена конструктивно
Середня енергія в імпульсі (0,2-2,0 кГц), мкДж	20 ±10%
Нестабільність енергії – середнє квадратичне відхилення/ середнє (0,2-2,0 кГц, при енергії імпульсу 20 мкДж, 10 хв.), %	<10
Розходження випромінювання (повний кут, по рівню 50 % інтенсивності) мрад	3,0 ±0,4
Тривалість імпульсу (0,2-2,0 кГц, по рівню 0,5) нс	5 ±2
Діаметр променя на виході апертури (по рівню 50%) мм	0,4> ±0,1
Профіль променя	Гаусів
Поляризація	>100:1, лінійна, ±5° від горизонталі

Еліптичність променя	$<1,75^*$
Висота променя відносно основи випромінювача, мм	$33,5 \pm 0,5$
Зміщення променя відносно центру апертури, мм	$\pm 0,25$
Кутове відхилення вихідного променя, мрад	$\pm 2,5$
Вимоги до зовнішнього запуску <ul style="list-style-type: none"> ● амплітуда імпульсу, В ● тривалість переднього фронту імпульсу, нс ● тривалість імпульсу, мкс ● вхідний опір, кОм 	$20 \pm 10\%$ <100 >1 и <20 1
Вихідний синхроімпульс <ul style="list-style-type: none"> ● амплітуда імпульсу, В ● тривалість переднього фронту імпульсу, нс ● тривалість імпульсу, мкс ● опір навантаження, кОм 	$20 \pm 10\%$ <10 $2,5 \pm 30\%$ 50



S6I



Таблиця В4 - Імпульсний переналагоджуваний титан-сапфіровий лазер модель CF125

Широкий діапазон переналадження імпульсного титан-сапфірового лазера забезпечується одним комплектом резонаторних дзеркал, який складається із «глухого» і) дзеркал. Висока ефективність перетворення випромінювання у другу гармоніку досягається використання того кристалу.

Характеристика	Параметри
Характеристики налагоджуваного лазера	
Активне середовище	титан-сапфір
Діапазон налагодження: <ul style="list-style-type: none"> ● на основній частоті ● на другій гармоніці 	690 - 1000 нм 350 - 500 нм
Ефективність перетворення випромінювання накачки в максимумі налагоджуваної кривої <ul style="list-style-type: none"> ● на основній частоті ● на другій гармоніці 	$\leq 25\%$ $\leq 8\%$
Ширина лінії випромінювання	0,1 - 0,2 нм
Розбіжність випромінювання	$\leq 1.5 \text{ мрад}$
Габаритні розміри	538x150x72 мм
Характеристики лазера накачки	
Діапазон хвилі випромінювання	532 нм
Енергія в імпульсі	300 мДж
Тривалість імпульсі	8-20 нс
Потужність випромінювання	15 Вт
Частота слідування імпульсів	50 Гц
Діаметр пучка	9 мм

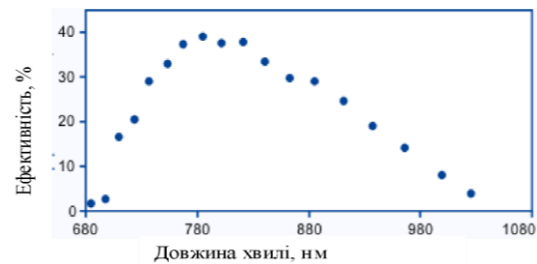


Рисунок В3 - Загальний вигляд імпульсного переналагоджуваного титан-сапфірового лазера моделі CF125

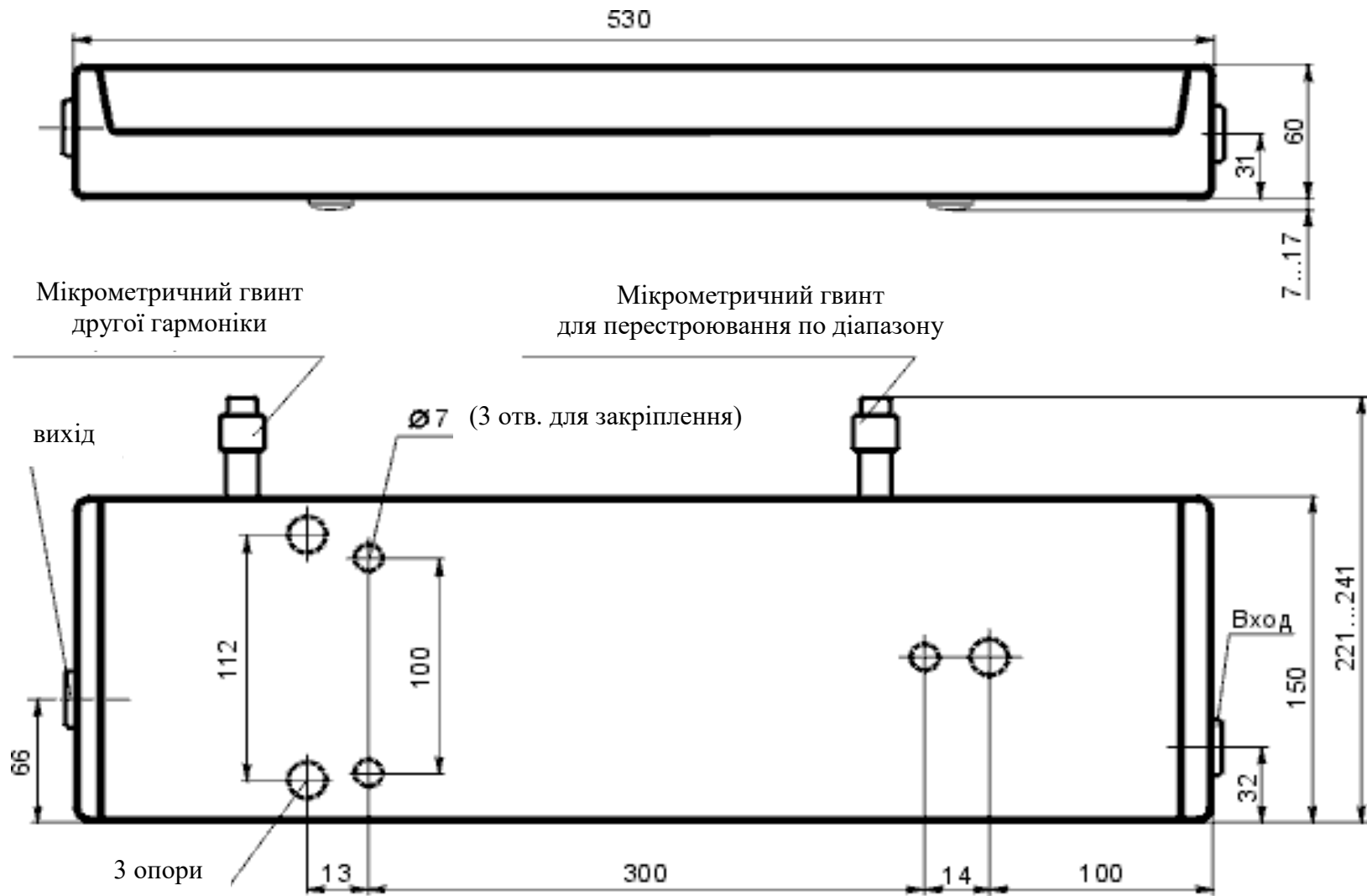


Рисунок В4 - Габаритні розміри лазера моделі CF125

Таблиця В5 - Серія лазерів ВЛМ та ВЛІ



Серія лазерів ВЛМ. Серія ВЛМ лазерів розроблена для інтеграції в кінцеве обладнання користувача для різноманітних областей застосування і розраховано на жорсткі умови експлуатації – при високих вібраціях та забрудненні, вологості до 90 %, великому перепаді температур.

Застосування: пайка, мікрозварювання, термообробка, гравірування, медичні прилади, наукове приладобудування

Параметри	ВЛМ-1	ВЛМ-5	ВЛМ-10	ВЛМ-20	ВЛМ-50	ВЛМ-100
Режим роботи	Неперервний, з можливістю модуляції до 5 кГц					
Максимальна вихідна потужність, Вт	1	5	10	20	50	100
Довжина хвилі випромінювання, нм	1030-1080					
Поляризація	випадкова					
Яскравість пучка, М ²	1,05					
Режим роботи						
Температурні умови, °С	0...+40					
Вживана потужність, Вт	25	60	90	125	150	240
Характеристики волокна						
Оптичний вихід	коліматор					
Довжина волокна, м	2-20					
Габарити						
Розмір, мм	165x70x230			252x75x220		
Вага, кг	3	3	5	7	8	



Серія лазерів ВЛІ Імпульсні волоконні лазери серії ВЛІ забезпечують імпульсне випромінювання із середньою потужністю до 50 Вт та тривалістю імпульсу від 80 до 120 нс. Робочі частоти модуляції від 20 кГц до 100 кГц. Вихідний коліматор оснащений оптичним ізолятором, який забезпечує захист від зворотного відбиття.

Застосування: лазерне маркування та гравіювання, прецизійне різання, мікрообробка, лазерне фрезерування

Параметри	ВЛІ-0,5-10	ВЛМ-1-20	ВЛМ-1-50
Режим роботи	імпульсний		
Енергія в імпульсі, мДж	0,5	1	1
Довжина хвилі випромінювання, нм	1062		
Поляризація	випадкова		
Яскравість пучка, М ²	1,4	1,8	1,8
Середня вихідна потужність, Вт	10	20	50
Тривалість імпульсу, нс	90-120		
Режим роботи			
Температурні умови, °С	0...+40		
Вживана потужність, Вт	120	150	240
Характеристики волокна			
Оптичний вихід	Коліматор із вбудованим ізолятором		
Довжина волокна, м	3		
Габарити			
Розмір, мм	215x95x286		
Вага, кг	8	9	12

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Б

Ближня зона дифракції $Z_0 \leq \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda}$ - де світлові промені в цій зоні є прямолінійними, а хвильовий фронт плоский.

Багатомодовий режим генерації лазерного випромінювання - режим роботи лазера, при якому лазерне випромінювання містить як повздовжні, так і поперечні моди в межах спектру частот даної лінії спонтанного випромінювання

В

Випромінювач - прилад, що перетворює електричну енергію збудження в енергію оптичного випромінювання заданого спектрального складу і просторового розподілу.

Внутрішнім фотоефектом називається явище, при якому електрони, що знаходяться в валентній зоні напівпровідника або зоні домішкового рівня, при поглинанні світла збуджуються і переходять в зону провідності.

Вентильним фотоелементом називаються фотоелектричні приймачі, в яких під дією випромінювання виникає фото Е.Р.С. на границі двох контактних матеріалів.

Вольт-амперна характеристика показує залежність струму фотоприймача від прикладеної до нього напруги; світловий (загальний) струм $I = I_s + I_f$, де I_s - струм при відсутності освітлення (темновий струм), I_f - фотострум.

Вольтова чутливість S_U характеризує значення сигналу в вольтах, віднесене до одиниці падаючого потоку випромінювання. Струміву і вольтову чутливість називають **інтегральною**, якщо вона характеризує чутливість до інтегрального потоку випромінювання.

Вентильний режим роботи - режим при якому фотодіод закорочений опором навантаження R_n без використання додаткового джерела зміщення.

Власні хвилі або **власні типи коливань резонатора** - нескінченний набір хвиль, які в результаті різноманітної взаємодії з елементами в кожному наступному проході відновлюють відносний просторовий розподіл амплітуди і фази, а також стан поляризації в кожному поперечному перетині резонаторної порожнини.

Випромінювач лазера - основні функціональна частина лазера, в якій енергія накачки перетворюється в лазерне випромінювання

Г

Гаусів пучок - це пучок у якого амплітуда напруженості поля максимальна на осі пучка і експоненційно зменшується до краю згідно з гладкою функцією Гауса.

Гаусів розподіл - вигляд неперервного розподілу, щільність ймовірності якого задається рівнянням $p(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$

Головні площини - дві спряжені площини, що розташовані перпендикулярно до оптичної осі, для яких лінійне збільшення ± 1 .

Головними точки системи - точки перетину головних площин з оптичною віссю.

Граничні характеристики показують здатність фотоприладу реєструвати випромінювання малої інтенсивності.

Гранична чутливість R_{sp} визначає рівень потужності світлового потоку, при якому сигнал дорівнює шуму.

Д

Дальня зона дифракції - достатньо велика відстань $Z_0 \gg \frac{\pi \cdot W_0^2}{\lambda}$ від перетяжки пучка, де радіус кривизни поверхні може бути описаний виразом $R(z) \approx z$.

Динамічний діапазон лінійності характеризує область значення променевого потоку Φ (від Φ_{\min} до Φ_{\max}), в якій енергетична характеристика лінійна: $\Delta = 10 \lg \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}}$.

Диференційний опір R_0 - відношення малих приростів напруги на приладі і струму через нього.

Е

Енергетична (світлова) характеристика показує залежність фотовідповіді приладу від інтенсивності збуджувального потоку випромінювання (ампер-ватна, вольт-ватна, люкс-амперна характеристика). Енергетичною характеристикою називають також залежність інтегральної або спектральної чутливості приладу від інтенсивності опромінення.

З

Задній фокус оптичної системи - це точка F' на оптичній осі в просторі зображення, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі предметів.

Задня фокальна площина оптичної системи - площина, яка проходить через задній фокус і перпендикулярна до оптичної осі.

І

Інерційність приладу характеризують постійні часу збільшення τ_z і спаду $\tau_{сп}$ фотовідгук при імпульсі випромінювання. При синусоїдальній модуляції світлового потоку швидкодію приладів характеризують граничною частотою, на якій фотовідгук зменшується до рівня 0,7 стаціонарного значення.

К

Кардинальні елементи оптичної системи - це фокуси, фокальні площини, головні площини, головні точки та фокусні відстані.

Кутівим збільшенням оптичної системи називається відношення тангенсів кутів, утворених спряженими променями з оптичною віссю.

Кут θ_{max} (числова апертура NA (Numerical Aperture)) - це максимально можливий кут, під яким світло може проходити в оптичне волокно, тобто прийматися ним.

Концентрична лінза - лінза, у якій центри кривизни поверхонь збігаються.

Короткохвильова (довгохвильова) границя спектральної чутливості - найменша (найбільша) довжина хвилі монохроматичного випромінювання, при якій монохроматична чутливість приладу дорівнює 0,1 від її максимального значення.

Квазімонохроматична хвиля - реальна хвиля лазера тобто являє собою вид коливань електромагнітного поля із середньою (центральною) частотою

$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi} \text{ і деякою шириною спектра } \Delta \nu_N.$$

Коліматор пучка лазерного випромінювання - оптичний перетворювач пучка лазерного випромінювання для зміни його діаметру та розходження

Критичне значення щільності потоку - значення потоку яке необхідне для досягнення за заданий проміжок часу в визначеній точці простору або об'ємі матеріалу заданої температури.

Л

Лінзою називається оптична деталь, обмежена двома заломлюваними поверхнями.

Лінійно-поляризована хвиля - якщо при розповсюдженні електромагнітної хвилі світловий вектор зберігає свою орієнтацію.

М

Меніск - це лінза з радіусами кривизни одного знаку.

Монохроматор - пристрій, в якому через декілька вихідних щілин пропускають лише невелику спектральну смугу.

Максимально допустимий постійний прямий струм $I_{пр.мах}$ - максимальне значення постійного прямого струму, при якому забезпечується задана надійність при тривалій роботі діода.

Максимально допустима зворотна постійна напруга $U_{зв.мах}$ - максимальне значення постійної напруги, що прикладена до діода, при якому забезпечується задана надійність при тривалій роботі діода.

Максимум спектрального розподілу $\lambda_{мах}$ - довжина хвилі світлового випромінювання, що відповідає максимуму спектральної характеристики випромінювання світло діода.

Максимум спектральної характеристики чутливості - довжина хвилі, що відповідає максимуму чутливості приладу.

Максимально допустима напруга U_{max} - значення постійної напруги, при якій відхилення параметрів приладу не перевищують встановлених меж.

Монохроматичність - характеризується здатністю лазерів випромінювати в вузькому діапазоні довжин хвиль

Мода - власне коливання електромагнітного поля в оптичному резонаторі, що характеризується певною частотою та особливістю розподілу поля в резонаторі

Модуляція добротності - швидка зміна добротності резонатору лазера

Моноімпульсний режим генерації лазерного випромінювання - режим модуляції добротності оптичного резонатора лазера із імпульсною оптичною накачкою, при якому за час дії імпульсу накачки генерується один імпульс лазерного випромінювання

Н

Накачка - фізичний процес переведення квантових частинок на збуджені енергетичні рівні під дією світла, струму, хімічної реакції і т.д. В результаті дії накачки утворюється інверсія населеності квантових рівнів і речовина, яка поглинає енергію накачки, стає активним лазерним середовищем.

О

Оптичною силою системи називається відношення показника заломлення середовища до відповідного фокусної відстані.

Оптичною активністю називається обертання площини поляризації світла при проходженні крізь оптично активні речовини.

Одночастотний режим генерації лазерного випромінювання – режим роботи лазера, при якому лазерне випромінювання містить тільки одну повздовжню моду в межах спектру частот даної лінії спонтанного випромінювання

Оптичний резонатор - сукупність декількох відбивальних елементів, що утворюють відкритий резонатор

П

Передній фокус оптичної системи - це точка F на оптичній осі в просторі предметів, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі зображення.

Передня фокальна площина - площина, перпендикулярна до оптичної осі, яка проходить через передній фокус.

Постійна пряма напруга $U_{пр}$ - значення напруги на світло діоді при протіканні постійного прямого струму.

Приймач випромінювання - пристрій, що служить для сприйняття енергії випромінювання і перетворення її в енергію інших видів з метою наступної реєстрації результату цього перетворення.

Потужність розсіювання - потужність, що виділяється при проходженні фотоструму; вона визначає розігрівання приладу.

Поперечна мода - мода, що характеризується кількістю вузлів поля, розташованих в напрямку кожної поперечної координати, і показує геометрію оптичного резонатора

Повздовжня мода - мода, що характеризується кількістю вузлів поля, розташованих в напрямку повздовжньої осі оптичного резонатора

Р

Робоча напруга U_p - постійна напруга, що прикладена до приладу, при якому забезпечені номінальні параметри при тривалій роботі в заданих експлуатаційних умовах.

С

Світлофільтр - пристрій, що слугує для виключення окремих спектральних ліній із загального спектра випромінювання смугових випромінювачів або для виділення якої-небудь області із неперервного спектра.

Світлодіодом називають випромінювальний напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом, який призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії і енергію некогерентного світлового випромінювання.

Сила світла I_v - світловий потік, що випромінюється діодом, який приходить на одиницю тілесного кута в напрямку, перпендикулярному площині випромінювального кристалу. Вказується при заданому значенні прямого струму і вимірюється в канделах (кд).

Світлова характеристика $I_v = f(I_{np})$ - залежність сили світла від прямого струму.

Спектральна характеристика - виражає залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі. Довжина хвилі випромінювального світла визначається різницею енергій двох енергетичних рівней, між якими проходить перехід електронів на випромінювальному етапі процесу рекомбінації і визначається вихідним матеріалом і легувальними домішками.

Спектральна характеристика чутливості показує реакцію фотоприладу на дію випромінювання з різною довжиною хвилі. Ця характеристика визначає спектральну область використання приладу, його спектральну і інтегральну чутливість.

Струмова чутливість S_I (А/лм або А/Вт) визначає значення фотоструму, що створюється одиничним потоком випромінювання.

Спектр випромінювання - набір монохроматичних хвиль, що утворюють випромінювальне електромагнітне поле.

Т

Темновий струм I_S - струм, що проходить через прилад при вказаній напрузі при відсутності потоку випромінення в межах спектральної чутливості.

Темновий опір R_T - опір приладу при відсутності падаючого на нього випромінення в межах його спектральної чутливості.

Температурні характеристики визначають залежність параметрів приладу (темновий струм, темновий опір, чутливість) від температури довкілля. Робочий температурний інтервал вказують в паспорті приладу.

ТЕМ - хвиля (Transversal Electromagnetic Mode – поперечна електромагнітна мода) - структура поля електромагнітної хвилі, коли обидва вектори розташовуються в площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження.

Ф

Фокальні площини системи - площини, проведені перпендикулярно головній оптичній вісі через точки F та F' .

Фотопровідність - це зміна провідності напівпровідників під дією випромінення.

Фоторезистор - напівпровідниковий прилад, принцип дії якого заснований на явищі фотопровідності.

Фотогальванічний ефект - це утворення фото Е.Р.С. при освітленні напівпровідникових систем.

Фотодіод - напівпровідниковий приймач світла, принцип дії заснований на зміні струму через $p - n$ - перехід при освітленні його світлом з довжиною хвилі, що відповідає області власного поглинання напівпровідникового матеріалу діода.

Фотодіодний режим - якщо на фотодіод подається від'ємне зовнішнє зміщення $U_{зм}$.

Ч

Частотні характеристики описують залежність чутливості від частоти модуляції випромінення або тривалості імпульсів і характеризують інерційність приладу.

Ш

Ширина спектральної лінії $\Delta\nu_N$ - частотний інтервал, в межах якого інтенсивність випромінювання або поглинання зменшується у двічі у порівнянні з максимальним значенням

Я

Яскравість L - величина, рівна відношенню сили світла до площі освітленої поверхні. Вимірюється в канделах на квадратний метр ($\text{кд}/\text{м}^2$) при заданому значенні прямого струму через діод.

Яскравісна характеристика $L = f(I_{np})$ - залежність яскравості від прямого струму.