

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

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання контрольних робіт
з дисципліни «Оптико-електронні пристрої роботів»
для здобувачів освітнього ступеня «магістр»
зі спеціальності G7 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
заочної форми навчання

Черкаси
2025

УДК 681.78:007.52] (07)
М 54

*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

М 54 Методичні рекомендації до виконання контрольних робіт з дисципліни «Оптико-електронні пристрої роботів» для здобувачів освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка заочної форми 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. – 85 с. – Назва з титульного екрана.

Видання поглиблює знання здобувачів освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка з проектування та метрологічного забезпечення оптичних та оптико-електронних пристроїв роботів. Запропоновано послідовність та приклади розв'язку завдань з використанням пакету прикладних програм MathCAD, наведено теми до контрольної роботи та перелік рекомендованої літератури.

УДК 681.78:007.52] (07)

Виробничо-практичне
електронне видання
комбінованого використання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання контрольних робіт
з дисципліни «Оптико-електронні пристрої роботів»
для здобувачів освітнього ступеня «магістр»
зі спеціальності G7 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
заочної форми навчання

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

В авторській редакції

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ	7
Опис навчальної дисципліни	
Мета та завдання навчальної дисципліни	
Програма навчальної дисципліни	
Структура навчальної дисципліни	
2. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ	12
КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ	
2.1 Ідеальна оптична система. Правила знаків	
2.2 Визначення кардинальних точок оптичної системи	
<i>Кардинальні елементи</i>	
<i>Залежності між положенням, розмірами предмету та зображення</i>	
<i>Побудова та розрахунок ходу променя крізь ідеальну оптичну систему</i>	
2.3 Графічна побудова зображень лінзами	
Приклад 1. Побудова зображення збиральною лінзою в залежності від відстані до предмету	
Приклад 2. Побудова зображення лінзою від'ємною в залежності від відстані до предмету	
2.4 Параксіальні параметри лінз	
2.5 Матричний метод розрахунку кардинальних точок оптичної системи	
Приклад 3. Визначення параксіальних параметрів випукло-пласкої та ввігнуто-пласкої лінзи	
Приклад 4. Визначення параксіальних параметрів подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи	
Приклад 5. Визначення параксіальних параметрів плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи	
Приклад 6. Визначення параксіальних параметрів випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска.	
Приклад 7. Визначення параксіальних параметрів випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска	
ДОДАТКИ	57
Додаток А - Зразок оформлення титульної сторінки	57
Додаток Б - Бланк завдання на контрольну роботу	58
Додаток В - Варіанти вихідних даних до контрольної роботи	59
Теоретичні питання	
Тема «Основні відомості про компоненти оптоелектроніки»	
Тема «Аналізатори зображення»	
Тема «Модуляція і демодуляція сигналів в ОЕП»	

- Завдання 1. Побудова зображення збиральною лінзою*
- Завдання 2. Побудова зображення розсіювальною лінзою*
- Завдання 3. Визначення параксіальних параметрів випукло-пласкої та ввігнуто-пласкої лінзи*
- Завдання 4. Визначення параксіальних параметрів подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи.*
- Завдання 5. Визначення параксіальних параметрів плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи.*
- Завдання 6. Визначення параксіальних параметрів випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска.*
- Завдання 7. Визначення параксіальних параметрів випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска*

Додаток Г – Приклади розрахунку в ППК MathCAD	68
Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань	79
Література	83

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

A

AB - розмір предмету

A і A' - спряжені точки

AA' - оптична вісь деякої центрованої системи

D

d - товщина лінзи вздовж оптичної вісі

F

F - передній головний фокус

F' - задній фокус системи

f' - задня фокусна відстань

f - передня фокусна відстань

H

H - передня головна площина

H' - задня головна площина

M

M - матриця перетворення оптичної системи

N

n, n' - показник заломлення

S

S_p - відстань від першої поверхні до вхідної зіниці

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

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

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

Φ - оптична сила системи

α - повздовжнє збільшення оптичної системи

β - лінійне збільшення оптичної системи

γ - кутове збільшення оптичної системи

σ - кут до оптичної вісі

ω - кут відхилення

2ω - кутове поле в просторі предметів об'єктива

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

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

ВСТУП

Сучасні оптичні прилади відіграють суттєву роль і слугують невід'ємною частиною науково-технічного прогресу. Оптичні і оптико-фізичні методи вимірювання і прилади використовуються в багатьох галузях – машинобудуванні та приладобудуванні для контролю точних деталей; в телебаченні та зв'язку; в сільському господарстві та харчовій промисловості; для наукових досліджень в галузі біології, екології, фізики та медицині. Прогрес науки і техніки, клінічної медицини в значній мірі визначається досягненнями в області оптичної електроніки. Оптико-електронна апаратура на основі світловипромінювальних діодів та лазерів має надзвичайно широкі можливості при застосуванні. Спеціалісти, які здатні творчо забезпечити створення та удосконалення оптичних електронних приладів і систем, повинні мати основні уявлення та прикладні знання з дисципліни «Оптико-електронні пристрої роботів».

В контрольній роботі студенти детально розглядають окремі теоретичні положення навчальної дисципліни «Оптико-електронні пристрої роботів». за темами: «Основні відомості про компоненти оптоелектроніки», «Аналізатори зображення», «Модуляція і демодуляція сигналів в ОЕП».

Практичні завдання формують у студентів вміння та навички їх застосування шляхом індивідуального виконання завдань.

Завдання №1, 2 знайомить студентів з кардинальними елементами оптичної системи; залежностями між положенням, розмірами предмету та зображення; кутовим, лінійним та повздовжнім збільшенням; властивостями фокальних площин. Дає практичні навички розрахунку та побудови зображення додатною та від'ємною лінзами.

Завдання 3-7 розглядає теоретичні положення параксіальних параметрів лінз різних типів, а саме випукло-плоскої та ввігнуто-плоскої лінзи; подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи; плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи; випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска; випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска.

В системі дистанційної освіти ЧДТУ <https://moodle.chdtu.edu.ua/course/view.php?id=17> є електронна версія конспекту, посібник до виконання самостійної роботи та список літератури, який знадобиться при виконання контрольної роботи. При цьому кожне запропоноване літературне джерело є активним з гіперпосиланням, що допоможе здобувачам швидко та якісно здійснити пошук необхідної теми до контрольної роботи. Окрім цього там же наведено низка додаткових навчальних матеріалів у вигляді гіперпосилання на відеоматеріали.

1. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Опис навчальної дисципліни

Галузь знань, спеціальність, освітня програма, освітній рівень	Загальні характеристики		Навчальне навантаження з дисципліни		
			денна форма навчання	заочна форма навчання	
<u>Галузь знань</u> G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка	Нормативна циклу професійної підготовки		Курс підготовки:		
			1		
<u>Спеціальність</u> 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» <u>Освітня програма</u> «Робототехнічні системи та автоматизація» <u>Освітній рівень</u> магістерський	Загальна кількість кредитів ЄКТС	4	Семестр підготовки:		
	Загальна кількість годин	120	1		
	Кількість аудиторних годин	48	Лекції		
			16		
	Кількість годин самостійної роботи	72	Практичні, семінарські		
			32		
	Мова навчання - українська	Лабораторні			
		-			
		Самостійна робота			
		72			
Форма підсумкового контролю					
		іспит			

Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета є надання студентам знань і вмінь в області базових принципів функціонування і проектування оптико-електронних елементів та пристроїв; вивчення порядку, основних методів та методик проектування оптичних систем на рівні їх конструктивних параметрів.

Завдання ознайомити студентів з елементами і характеристиками оптико-електронних приладів; передавальними та приймальними оптичними системи ОЕП. Навчити розрахунку оптичних та оптико-механічних вузлів ОЕП.

Задачею вивчення дисципліни згідно до вимог ОПП за освітньою програмою «Робототехнічні системи та автоматизація» спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка", які пред'являються до магістра є набуття здобувачами нижче приведених загальних та фахових компетентностей і отримання результатів навчання у вигляді програмних результатів.

№ з/п	Результати навчання
<i>Відповідно до ОПП за освітньою програмою «Робототехнічні системи та автоматизація» спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" 2025 р</i>	
1.	Застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні наукові здобутки, а також критичне осмислення сучасних у сфері автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки для розв'язування складних задач професійної діяльності (ПР03).
2.	Застосовувати сучасні підходи і методи моделювання та оптимізації для дослідження та створення ефективних систем автоматизації складними технологічними та організаційно-технічними об'єктами. (ПР04)
3.	Вміти розроблювати оптико-електронні пристрої та системи (на етапах розрахунку, проектування, конструювання та моделювання) сучасні комп'ютерні технології (ПР19).

Програма навчальної дисципліни

Змістовий модуль №1 <i>Оптичні системи ОЕП</i>	
ТЕМА 1. Вступ	
<i>Класифікація оптико-електронних приладів. Промислові роботи із комп'ютерним зором. Критерії якості оптико-електронних приладів.</i>	
ТЕМА 2 Основні вимоги, що пред'являються до ОЕП	
<i>Вимоги до зовнішніх умов та умов експлуатації. Техніко-конструктивні вимоги. Технологічні вимоги. Вимоги надійності.</i>	
ТЕМА 3 Основи теорії оптичних систем	
<i>Основні закони геометричної оптики. Правила знаків. Формування зображень оптичними системами. Теорія ідеальної оптичної системи. Матрична теорія Гаусової оптики.</i>	
ТЕМА 4 Оптична система ОЕП	
<i>4.1 Загальні метрологічні вимоги до елементів оптико-електронних приладів Структура і особливості оптичної системи ОЕП. Вимоги до джерел оптичного випромінювання. Вимоги до середовища розповсюдження оптичного випромінювання. Вимоги до оптичної системи. Вимоги до оптичних фільтрів. Вимоги до аналізаторів зображення. Вимоги до приймачів оптичного випромінювання. Вимоги до підсилювача-перетворювача. Забезпечення єдності вимірювань в оптико-електронних приладах</i>	
<i>4.2 Критерії якості оптичної системи ОЕП</i>	
<i>4.3 Типові оптичні системи</i>	
<i>Телескопічні системи (оптичні характеристики. Об'єктиви і окуляри телескопічних систем. Обмеження пучків в телескопічних системах. Алгоритм розрахунку телескопічної системи (Габаритний розрахунок труби Кеплера. Розрахунок системи Галілея)</i>	

Проекційні системи (основні характеристики проекційних систем. Освітлювальні системи проекційних приладів. Габаритний розрахунок проекційної системи.)

Мікроскопи (Оптичні характеристики мікроскопу. Глибина зображуваного простору мікроскопу. Обмеження пучків. Дозвільна здатність мікроскопу, Глибина простору предметів мікроскопа. Розрахунок геометричної складової T_z . Розрахунок акомодативної складової T_a . Розрахунок дифракційної складової T_d . Об'єктиви, окуляри та тубус мікроскопів). Габаритний розрахунок приладу на основі оптичної схеми мікроскопу

Оптична система лупи (Основні характеристики. Видиме збільшення лупи. Поле зору лупи. Глибина простору різкого для ока зображення, сформованого лупою. Типи луп.)

Фотографічні системи (Оптичні характеристики фотооб'єктиву. Критерій добротності. Глибина зображуваного простору та глибина різкості зображення. Дозвільна здатність фотооб'єктиву.

4.4 Оптичні вузли оптико-електронних приладів. Об'єктиви. Конденсори приймальних та передавальних оптичних систем. Оптичні компенсатори. Вимоги до оформлення креслення оптичних деталей. Оформлення оптичних схем.

4.5 Оптичні системи для лазерів. Оптична схема для фокусування лазерного випромінювання. Оптичні системи для зменшення розходження променів лазера. Одночастотний лазерний інтерферометр Майкельсона. Принцип вимірювання відстаней та лінійних переміщень. Двочастотні лазерні інтерферометри. Лазерні далекоміри. Види лазерних далекомірів. Особливості далекомірів при проектуванні.

4.6 Фотоелектричні оптичні системи. Призначення і принципова схема фотоелектричної системи. Світлоенергетичний розрахунок фотоелектричної системи з урахуванням спектральних та інтегральних характеристик. Фотоелектрична оптична система з приймачем випромінювання, розташованим в площині зображення джерела. Фотоелектрична оптична система з приймачем, розташованим в площині вихідної зіниці системи. Фотоелектрична оптична система з лазером

4.7 Тепловізійні оптико-електронні прилади

4.8 Матеріали оптичних систем ОЕП

ТЕМА 5 Оптичне випромінювання

Оптичний спектр електромагнітних коливань.

Основні енергетичні та фотометричні величини і співвідношення між ними. Енергетичні і світлотехнічні (фотометричні) величини.

Співвідношення між енергетичним світлотехнічними величинами.

Вплив середовища розповсюдження оптичного випромінювання на роботу ОЕП. Загальні поняття розповсюдження випромінювання в атмосфері. Поглинання в земній атмосфері. Розсіювання випромінювання в атмосфері. Флуктуації прозорості атмосфери і їх вплив на роботу ОЕП.

Змістовий модуль 2.

<i>Компоненти оптоелектроніки</i>
<p>ТЕМА 6. Основні відомості про компоненти оптоелектроніки</p> <p><i>Керовані джерела світла.</i></p> <p><i>Загальні відомості. Класифікація приймачів ОЕП. Параметри приймачів випромінювання. Характеристики приймачів випромінювання. Паспортизація приймачів. Перерахунок характеристик.</i></p> <p><i>Фотоприймачі. Вибір приймача випромінювання і його узгодження з оптичною системою і електронним трактом. Фотоприймальні пристрої на фоторезисторах. Фотоприймальні пристрої на фотодіодах. Фотоприймальні пристрої з приймачами випромінювання на основі зовнішнього фотоефекту. Фотоприймальні пристрої з тепловим випромінюванням. Вибір і розрахунок основних параметрів попередніх підсилювачів фотоприймальних пристроїв.</i></p> <p><i>Оптрони. Свілопроводи.</i></p>
<p>ТЕМА 7. Енергетичні розрахунки ОЕП</p> <p><i>Енергетичні розрахунки ОЕП. Узагальнена методика енергетичного розрахунку. Вибір енергетичної моделі ОЕП. Розрахунок значень потоків і опроміненості на вході оптико-електронного приладу. Розрахунок основних габаритних параметрів приймальної оптичної системи. Розрахунок і вибір параметрів джерела та приймача випромінювання на основі енергетичних співвідношень. Енергетичний розрахунок автоколіматора. Розрахунок втрати в оптичній системі. Енергетичний розрахунок тепловізійної системи</i></p> <p><i>Особливості габаритного розрахунку приймальних оптичних систем ОЕП</i></p>
<p>ТЕМА 8. Принципи розроблення конструкції приладу виходячи з вимог точності і надійності</p> <p><i>Критерії якості, класифікація приладних похибок. Точнісні критерії якості оптико-електронних приладів. Властивості похибок. Узагальнена методика розрахунку інструментальних похибок</i></p> <p><i>Розрахунок і мінімізація динамічної і шумової похибок. Аналіз та розрахунок похибки пристрою пожежного оповіщувача. Приклади розділення похибок оптичних приладів на групи</i></p> <p><i>Основне рівняння точності приладу.</i></p> <p><i>Методи підвищення точності при проектуванні оптичних приладів. Технологічний метод. Проектно-конструкторський метод (Робастне проектування методом Тагучі). Компенсаційний метод підвищення якості</i></p> <p><i>Теоретико-ймовірнісний підхід при оцінюванні точності приладу</i></p>
<p>ТЕМА 9. Моделювання оптичних систем (програма Абер, WinLens)</p> <p><i>Моделюванні, аналіз, оптимізація та розрахунок допусків центрованих, децентрованих і просторових оптичних систем з фіксованими або змінними параметрами.</i></p> <p><i>Аналіз точкових діаграм: стандартна, з деформуванням поверхні зображень, матрична по довжинам хвиль, матрична по конфігураціям, повного поля (спільно для всіх точок поля зору).</i></p>

Аналіз аберацій: поперечні, хвильові, сферична повздожжня і поперечна, кривизна поля, астигматизм, дисторсія абсолютна і відносні, дисторсія сітки, хроматизм положення, хроматизм збільшення.

Структура навчальної дисципліни

№ теми	Назва модулів і тем	Форми організації навчання, кількість годин						Література, інформаційні ресурси
		Денна форма			Заочна форма			
		Лекції	Практичні, лабораторні роботи	Самостійна робота	Лекції	Практичні, лабораторні роботи	Самостійна робота	
Змістовий модуль 1. Оптичні системи ОЕП								
1	Тема 1. Вступ	0,5		1				
2	Тема 2 Основні вимоги, що пред'являються до ОЕП	0,5		2				
3	Тема 3 Основи теорії оптичних систем	2	16	10				
4	Тема 4. Оптична система ОЕП	4	7	12,5				
5	Тема 5. Оптичне випромінювання	2		6				
Змістовий модуль 2. Компоненти оптоелектроніки								
6	Тема 6. Основні відомості про компоненти оптоелектроніки	3	4	10,5				
7	Тема 7. Енергетичні розрахунки ОЕП	2	3	10				
8	Тема 8. Точніший розрахунок ОЕП	1	2	10				
9	Тема 9 Моделювання оптичних систем (програма Абер, WinLens)	1		10				
	Разом	16	32	72				

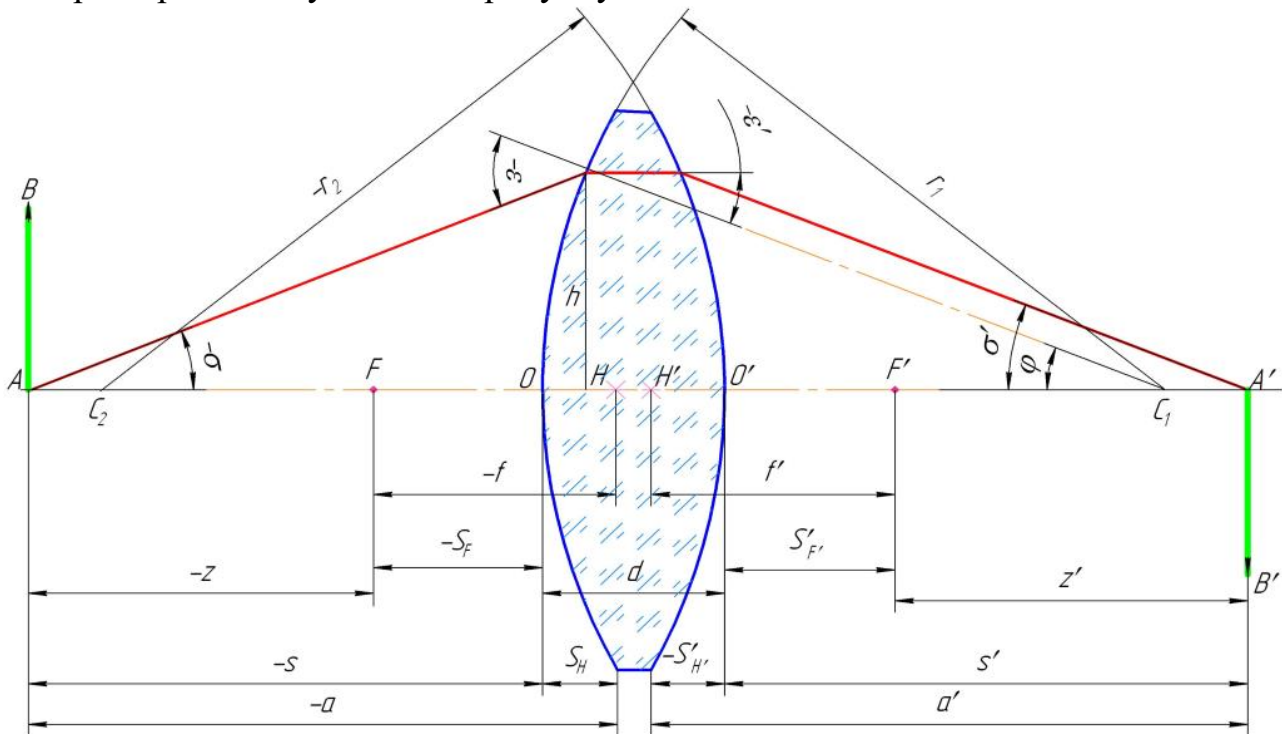
2. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

2.1 Ідеальна оптична система. Правила знаків

Оптичною системою називається сукупність оптичних деталей (лінз, призм, дзеркал і т.п.), що призначені для формування пучків світлових промінів [1-4, 6]. Кожна оптична деталь обмежується поверхнею, на якій промені піддаються заломленню або відбиттю. Поверхні можуть бути плоскими, сферичними, асферичними, циліндричними та інш. В більшості оптичних систем використовують сферичні і плоскі поверхні.

Позитивним напрямком вздовж оптичної вісі вважається напрямок світла зліва направо.

Оптичну систему прийнято зображувати так, щоб її права (вхідна) поверхня розташовувалась на рисунку зліва.



При розрахунку оптичної системи необхідно дотримуватися правил [6]:

1. кут між променем і оптичною віссю (кути σ та σ') відліковується від оптичної вісі і вважається додатним, якщо він утворений обертанням променю від вісі за годинниковою стрілкою; при обертанні променю в протилежну сторону кут вважається від'ємним;

2. лінійні величини предмету і зображення, а також відрізки висот променів вважаються додатними, якщо вони розташовані над віссю, і від'ємними – під віссю;

3. радіус кривизни поверхні вважається додатним, якщо її центр кривизни знаходиться з права від поверхні, а від'ємним – зліва від поверхні;

4. величини товщини і повітряних проміжків між заломлюючими поверхнями при русі світла зліва направо завжди вважаються позитивними;

5. кути падіння між променем і нормаллю до поверхні в точках падіння променю ϵ і ϵ' (кути падіння і заломлення) вважаються додатними, якщо нормаль повинна бути повернута по ходу годинникової стрілки, щоб співпадати з напрямком променю;

6. кут ϕ між нормаллю і оптичною віссю вважається додатним, якщо оптична вісь повинна бути повернута по напрямку руху годинникової стрілки, щоб збігатися з нормаллю;

7. при відбитті на поверхні змінюється знак у показника заломлення n' , кута відбиття ϵ' і величини відстані між відбиваючою поверхнею і наступною (при русі світла справа наліво);

8. фокусні відстані вважаються додатними по напрямку світла від головних площин;

9. Знак відрізка $SF, S'F'$ 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.

10. Знак відрізка $SH, S'H'$ 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».

Відповідні (однойменні) і спряжені точки, відрізки і кути в просторі предметів і в просторі зображення вказуються однаковими буквами, але позначення, що відноситься до простору зображення, відрізняється знаком «штрих» зверху кожної букви.

2.2 Визначення кардинальних точок оптичної системи

Кардинальні елементи

Будь-яку центровану систему, в тому числі і лінзу, можна задати так званими *кардинальними точками* [1-4, 6]:

- головним фокусами F, F' ;
- головними точками H, H' ;
- вузловими точками, які в найпростіших випадках співпадають з головними рис.2.1.

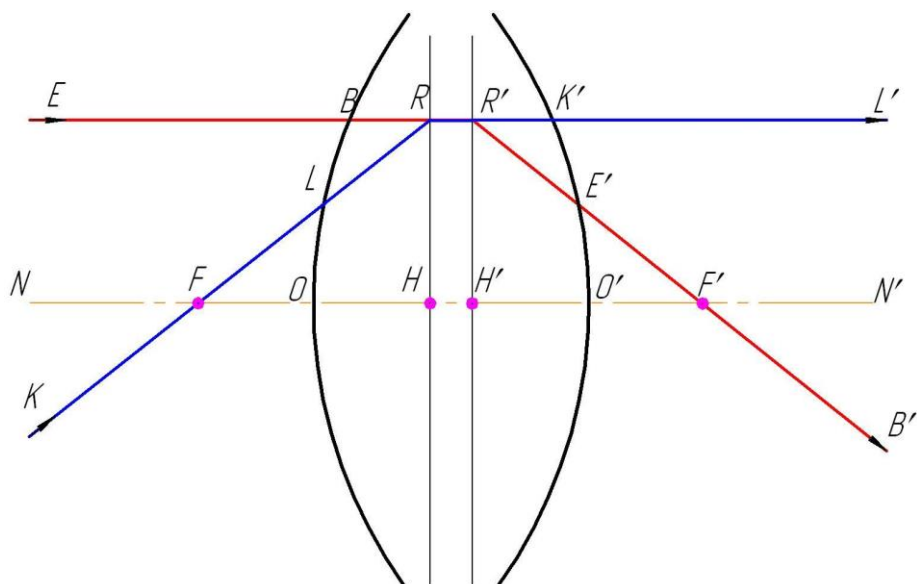


Рисунок 2.1 – Кардинальні точки оптичної системи

Таке уявлення є наближеним і можливо лише для ідеальної системи, тобто для системи в якій зберігається гомоцентричність пучків променів і зображення геометрично побідне предмету. На рис.2.1 NN' - головна оптична вісь, відносно якої центрується системи. Якщо через систему пропустити пучок променів, паралельний до головної оптичної вісі (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, по відношенню до 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 вісі. Тому, якщо промінь KL проходить через точку F , то спряжений до нього промінь $K'L'$ виходить із системи паралельно до головної оптичної вісі рис.2.1.

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

Дві спряжені площини, що розташовані перпендикулярно до оптичної вісі, для яких лінійне збільшення ± 1 , називають **головними площинами**. Розрізняють передню і задню головні площини рис.2.1.

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 вісі 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 вісі 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 вісі, називається **задньою фокальною площиною** оптичної системи. Ця площина є зображенням нескінченно віддаленої площини.

Переднім фокусом системи є точка F . Точка F на оптичній вісі в просторі предметів, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі зображення, називається **переднім фокусом оптичної системи**. Площину, перпендикулярну до оптичної вісі, 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**.

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.2.2.

Із побудови $H'M_1 = AB = y$, $HM_2 = A'B' = -y'$, і подібності трикутників ABF та FHM_2 визначаємо [1-4, 6]:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-z} \Rightarrow \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} \quad (2.1)$$

Аналогічно для другої пари подібних трикутників $H'M_1F'$ і $F'A'B'$ маємо:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{f'}{z'} \Rightarrow \frac{y'}{y} = -\frac{f'}{z'} \quad (2.2)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (2.2) та (2.1) при $-f = f'$, отримаємо **формулу Ньютона** [1, 3, 6]:

$$\begin{aligned} z \cdot z' &= f \cdot f' \\ z \cdot z' &= f'^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Із формули (2.1) (2.2) отримаємо формулу лінійного збільшення оптичної системи [1-4, 6]:

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{f'}{z'} \quad (2.4)$$

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.2.3 з урахуванням знаків визначаємо [1-4, 6]:

$$\begin{aligned} z &= a - f; \\ z' &= a' - f' \end{aligned} \quad (2.5)$$

Підставивши значення (2.5) 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* [[1-4, 6]:

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1 \quad (2.6)$$

Якщо $-f = f'$, то формула (2.6) прийме вигляд [1-4, 6]:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (2.7)$$

Лінійне збільшення системи можна виразити через відрізки a і a' . Із виразу (2.6) маємо:

$$\frac{a'}{a} = \frac{f' + z'}{f + z} \quad (2.8)$$

Підставляємо значення z' із формули (2.5) в вираз (2.8):

$$\frac{a'}{a} = \frac{f' \cdot z + f \cdot f'}{f \cdot (f + z)} = \frac{f'(z + f)}{z(z + f)} = \frac{f'}{z} \quad (2.9)$$

Із формули Ньютона як наслідок маємо:

$$\frac{a'}{a} = \frac{f'}{z} = \frac{z'}{f} \quad (2.10)$$

Співвідношення (2.10) дозволяє отримати вираз для лінійного збільшення через відрізки a і a' [1-4, 6]:

$$\beta = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{a'}{a} \quad (2.11)$$

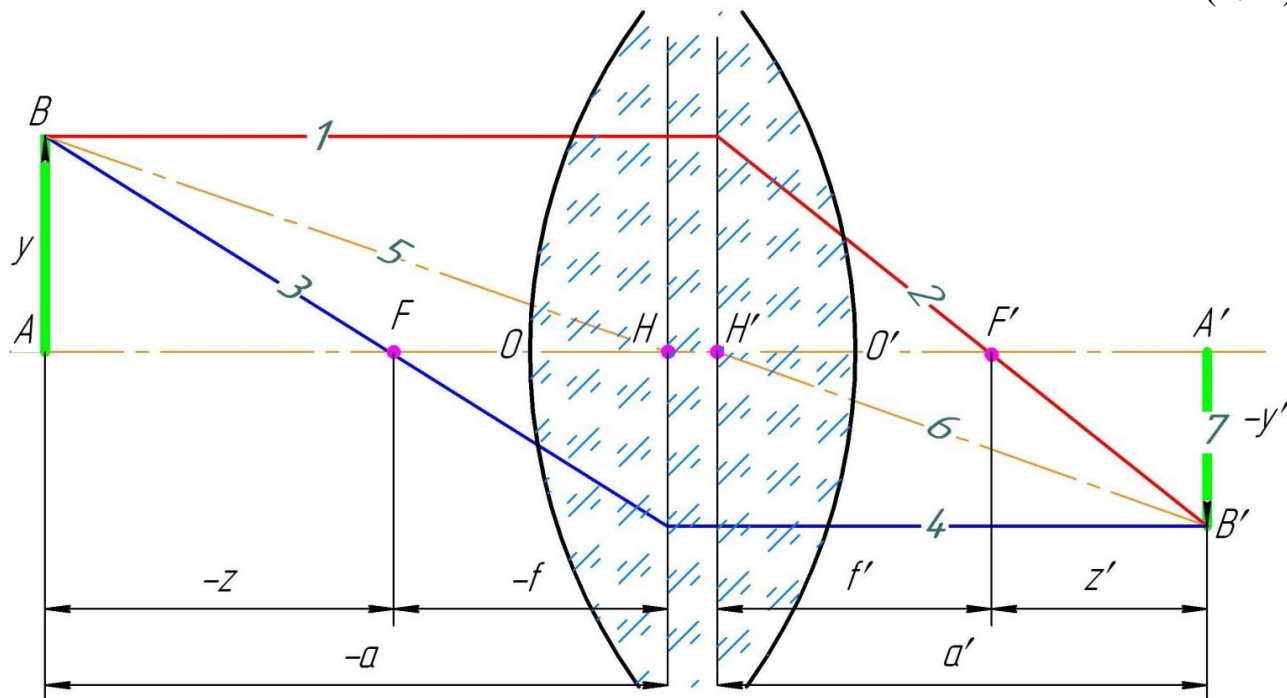


Рисунок 2.2 – Лінійне збільшення оптичної системи

Кутовим збільшенням оптичної системи називається відношення тангенсів кутів, утворених спряженими променями з оптичною віссю рис.2.3 [1-4, 6]:

$$\gamma = \frac{\text{tg}(\sigma')}{\text{tg}(\sigma)} \quad (2.12)$$

Із рис.2.3 маємо:

$$\text{tg}(\sigma) = \frac{h}{a}; \quad \text{tg}(\sigma') = \frac{h}{a'} \quad (2.13)$$

Підставляємо значення (2.13) в формулу (2.12), отримуємо: $\gamma = \frac{a}{a'}$.
Приймаючи до уваги (2.12), знаходимо:

$$\gamma = \frac{a}{a'} = \frac{z}{f'} = \frac{f}{z'} \quad (2.14)$$

Використовуючи співвідношення (2.14) і (2.11), отримаємо залежність між кутовим і лінійним збільшенням:

$$\gamma = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{1}{\beta} \quad \text{або} \quad \gamma \cdot \beta = -\frac{f}{f'} \quad (2.15)$$

В окремому випадку, коли $-f = f'$, формула (2.15) має вигляд $\gamma \cdot \beta = 1$. Формула (2.15) 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

$\alpha'_{H'}$, який не рівний куту α_H , оскільки $tg(\alpha'_{H'}) = -\frac{f}{f'} \cdot tg(\alpha_H)$.

Тільки у випадку $-f = f'$, кути $\alpha'_{H'}$ і α_H будуть рівні.

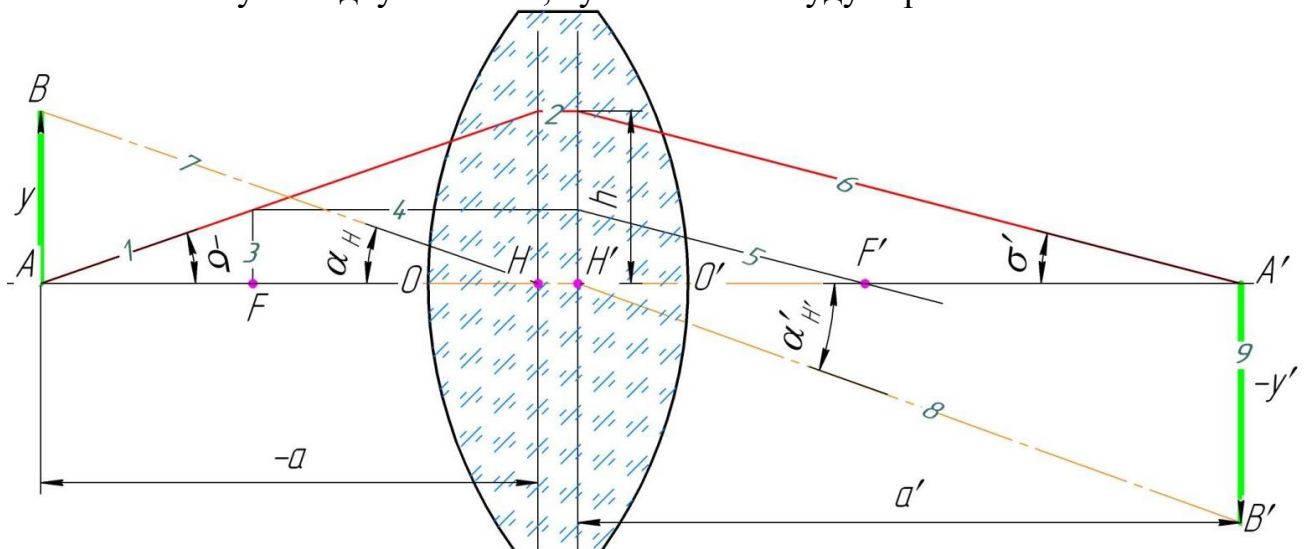


Рисунок 2.3 – Кутове збільшення оптичної системи

Побудова та розрахунок ходу променя 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 променя крізь позитивну на від’ємну оптичну систему показано на рис.2.5.

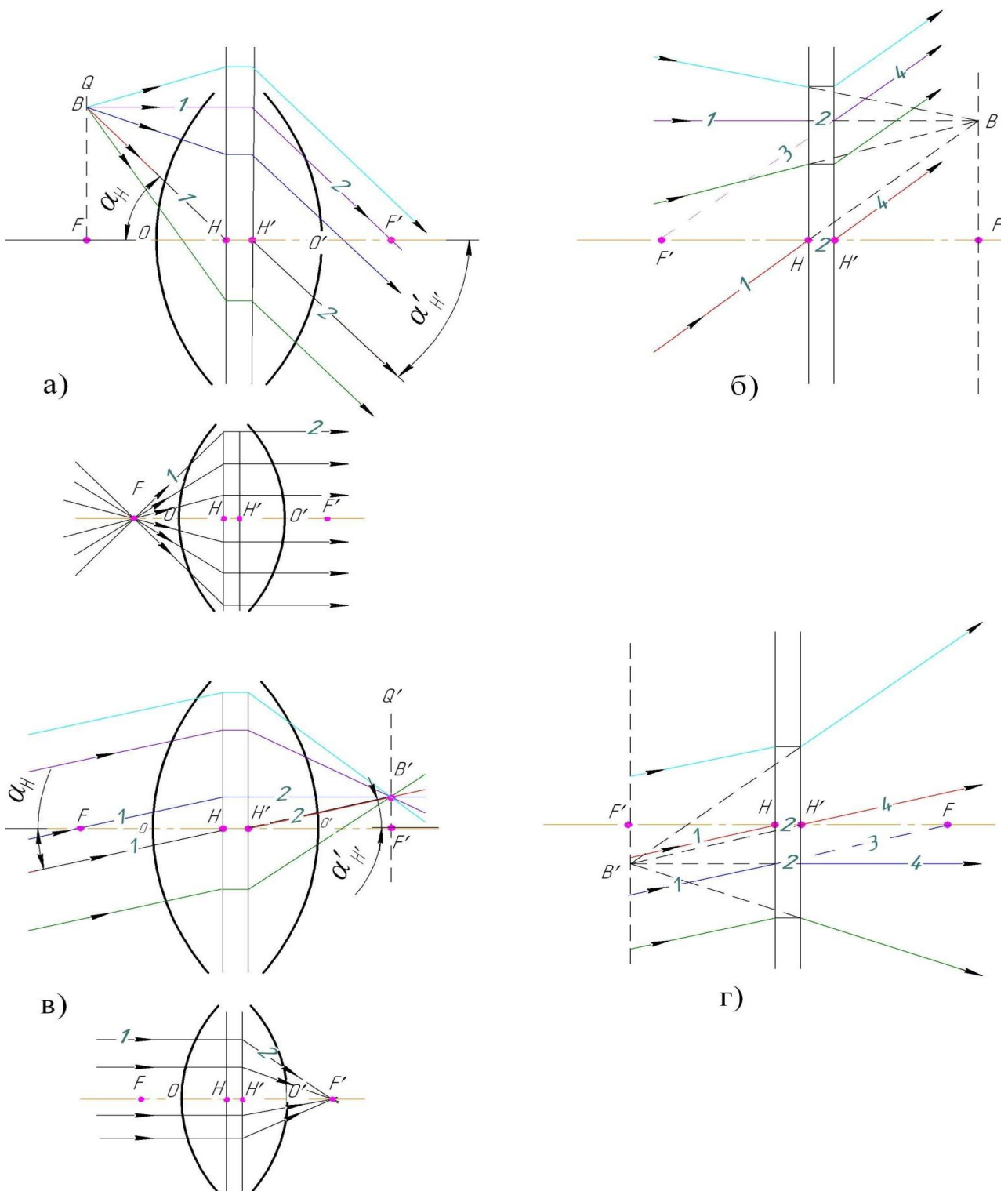


Рисунок 2.5 – Властивість фокальних площин:

- 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 вісі або паралельно до оптичної вісі
- г) від’ємна оптична система: промені падають паралельним пучком під деяким кутом до оптичної вісі

2.3 Графічна побудова зображень лінзами

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

На рис.2.6 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.2.6 показано побудова зображення для п'яти положень 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) $a = f$.

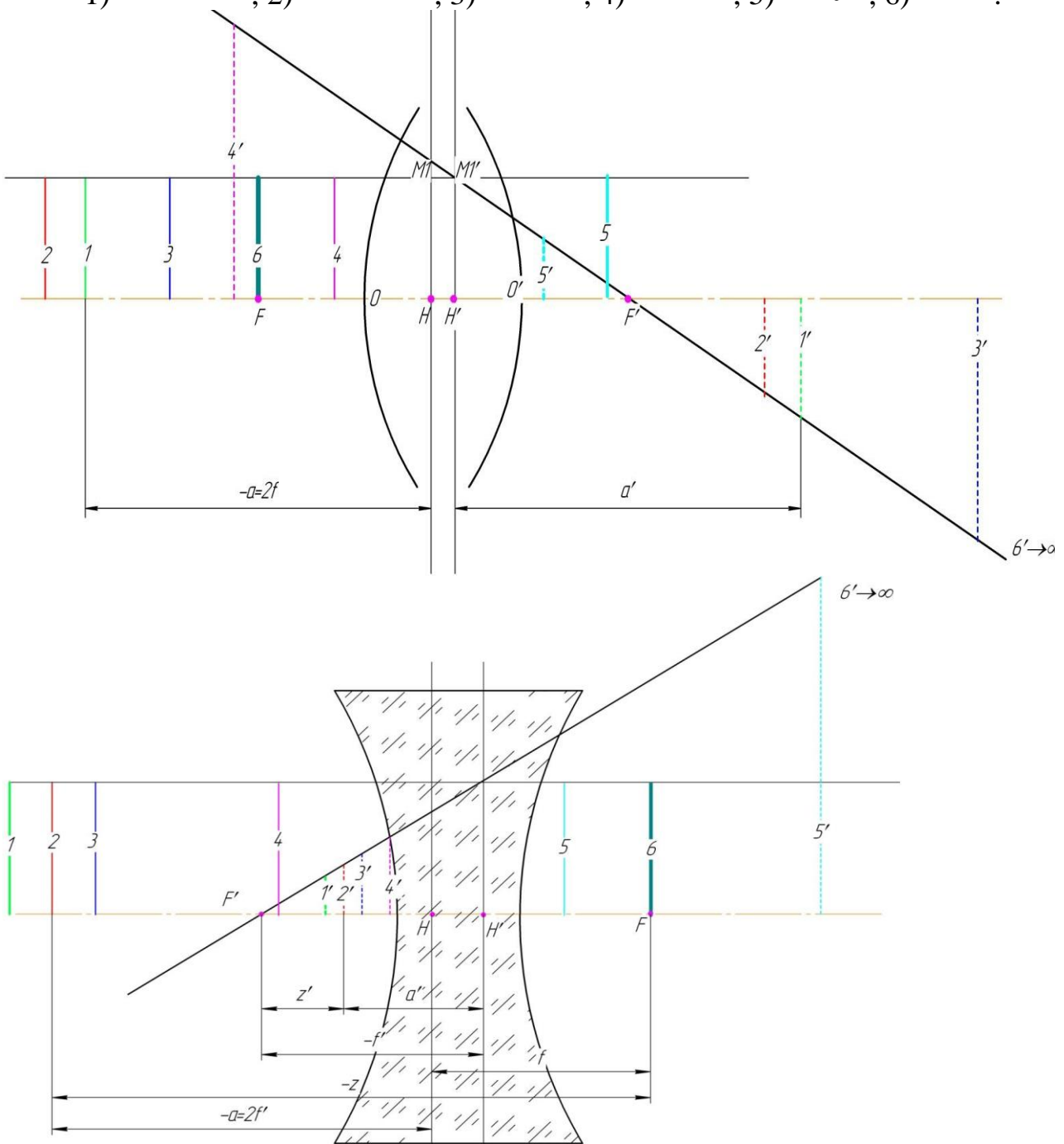


Рисунок 2.6 – Побудова зображення лінзами: а) збиральною; б) розсіювальною

Приклад 1. Побудова зображення збиральною лінзою в залежності від відстані до предмету

Побудувати зображення лінзою додатною в залежності від відстані до предмету. Дано: $-a = 86 \text{ мм}$, $f' = 43 \text{ мм}$, $y = 26 \text{ мм}$, $f = -f'$, $-\sigma = 20^\circ$.

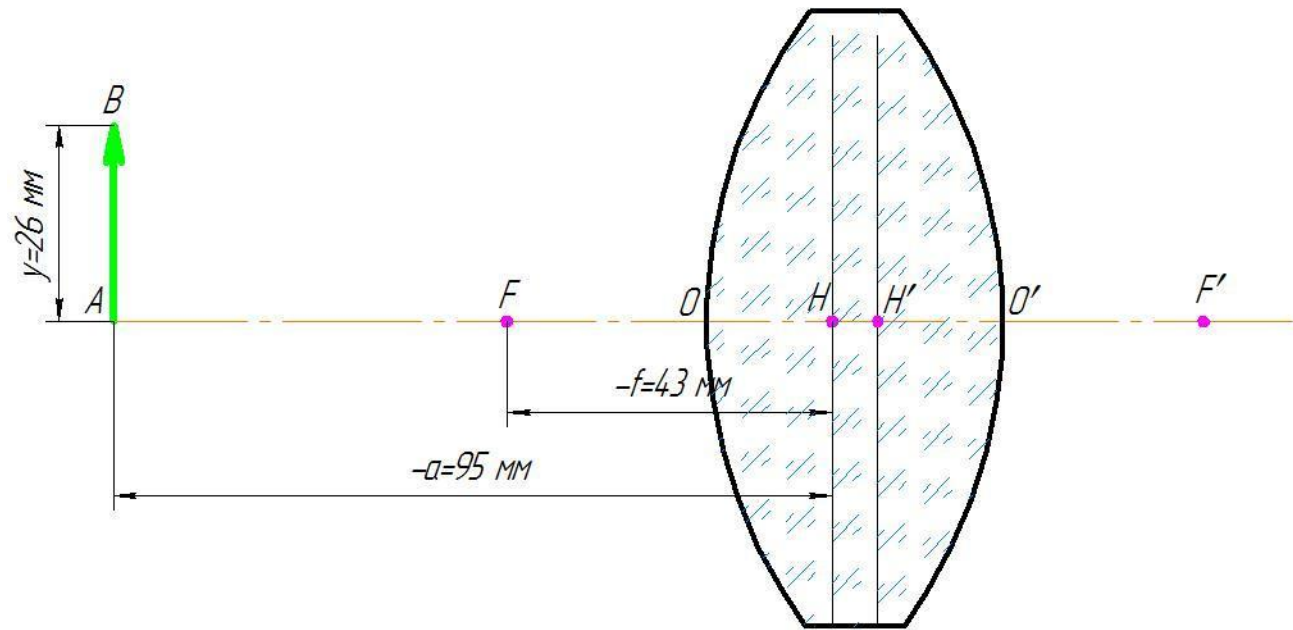
Таблиця 2.1 – Результати розрахунку додатної лінзи в залежності від відстані до предмету

предмет		1	2	3	4	5
дан о	a	-86	-95	-65	-25	+44
	f'	43				
	y	26				
роз рах унк ові 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		2.7			2.8	2.9

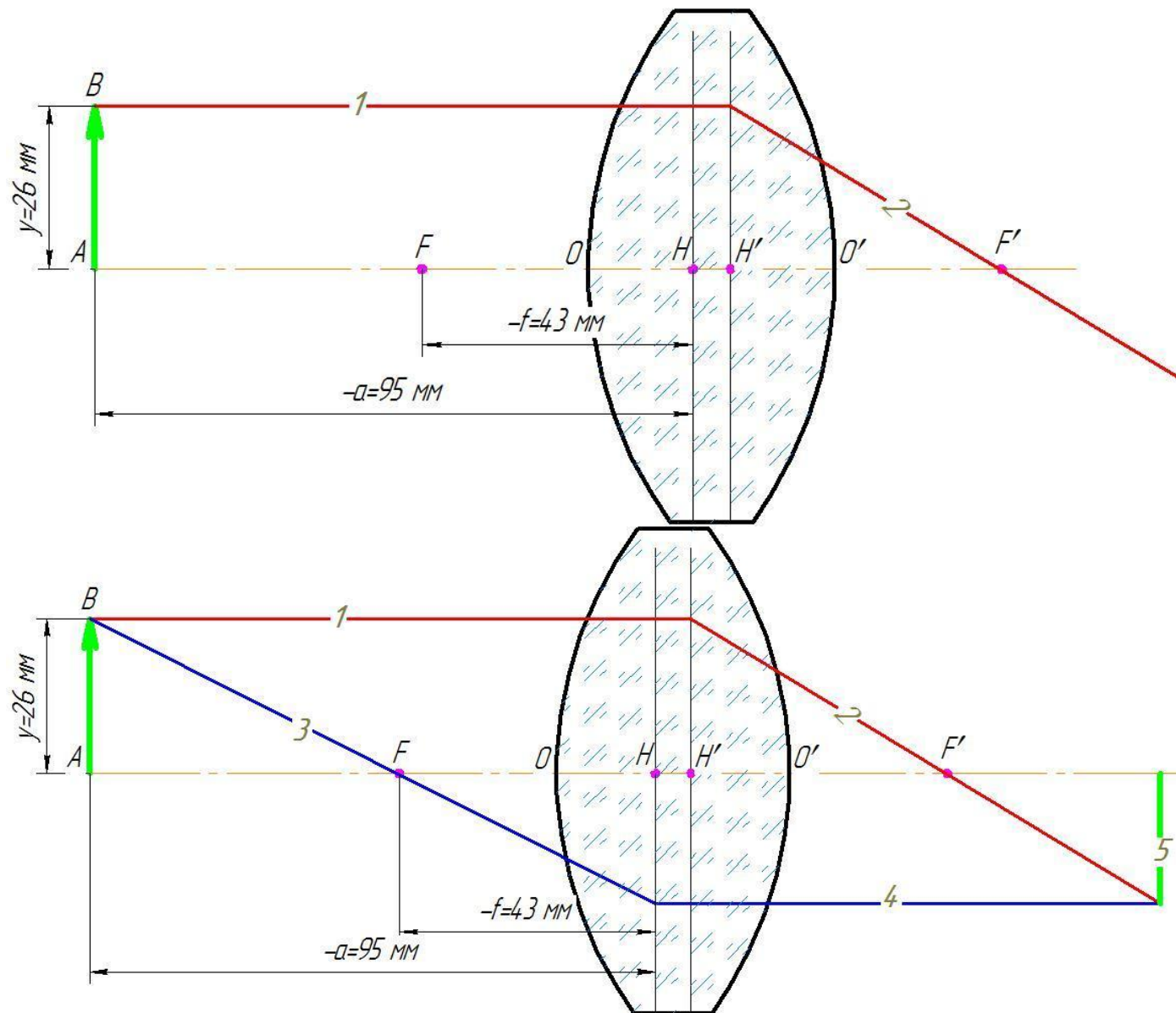
*Примітка

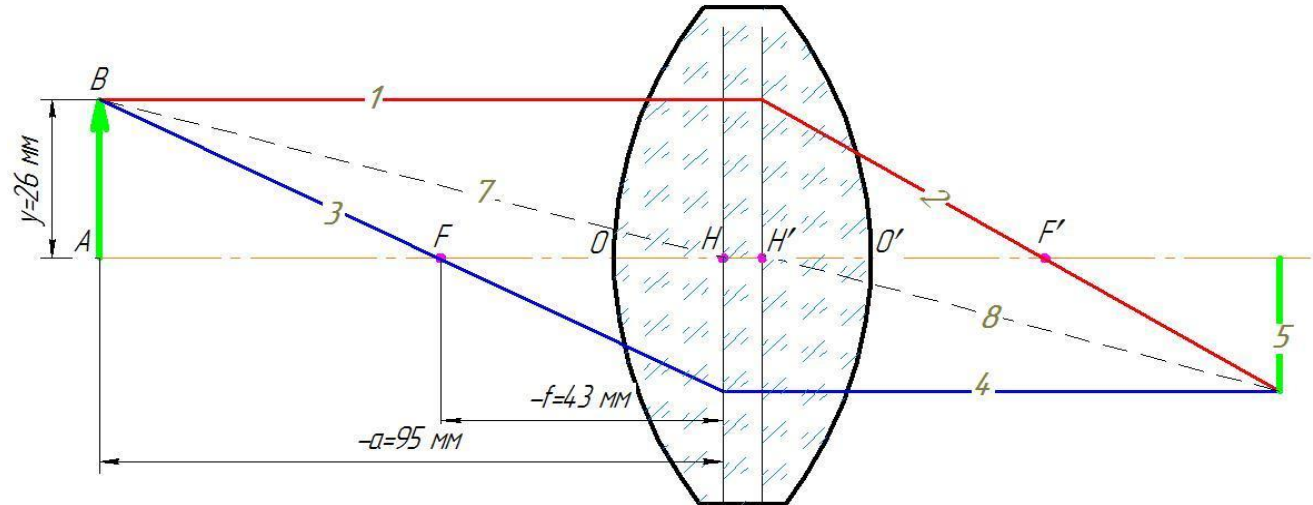
1. Знак z, z' при побудові визначається відносно фокуса.
2. Знак a, a' при побудові визначається відносно головних площин.
3. На рисунках порядок (послідовність) побудови променів подано цифрами 1, 2, 3 і т.д.
4. Приклад розрахунку в ППК MathCAD подано в додатку Г.

Позначаємо на ескізі
ОС параметри,
наприклад, для



2. Визначаємо зображення точки В.





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

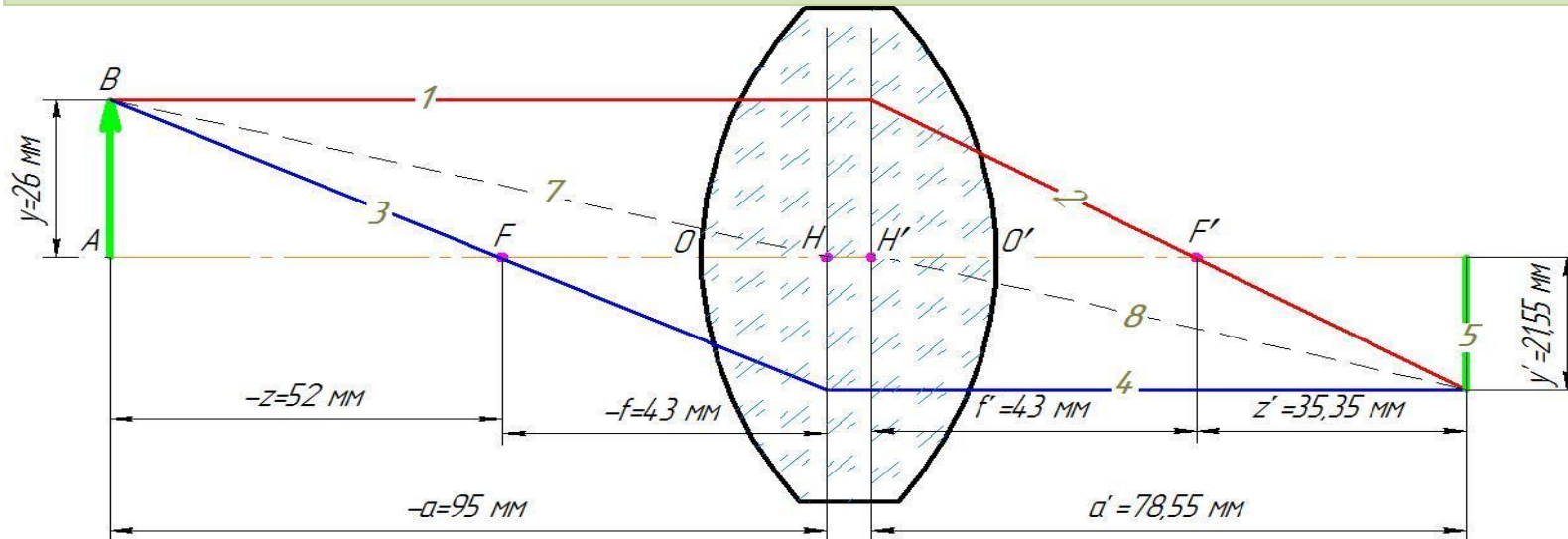
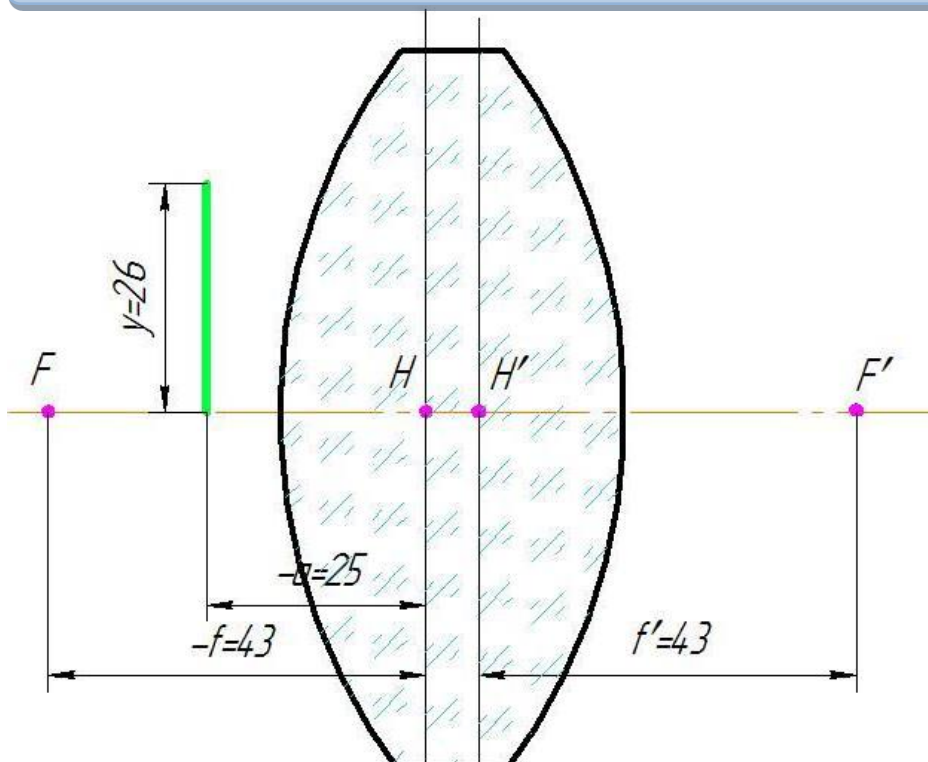
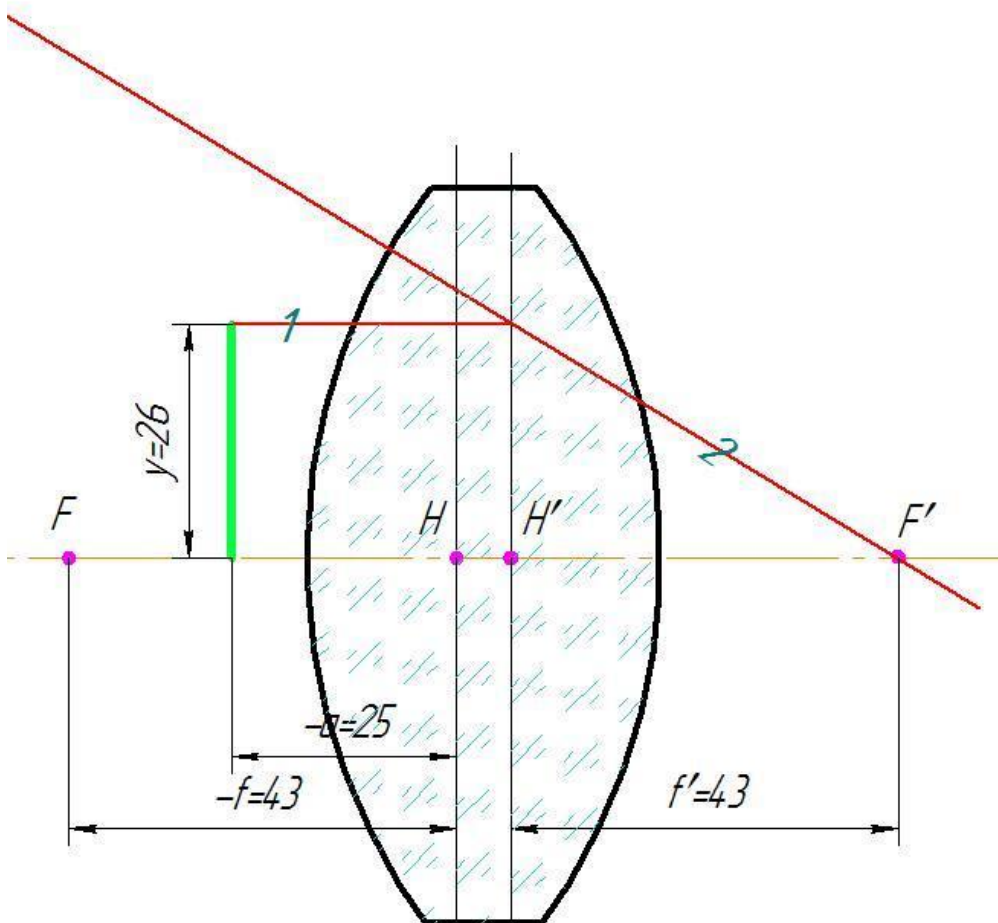


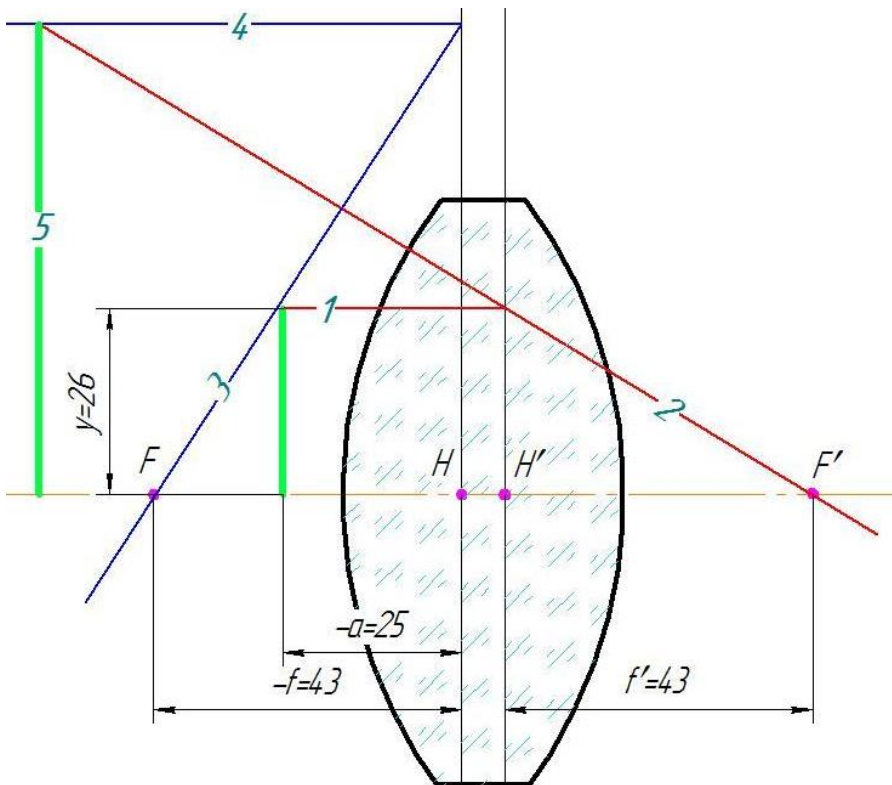
Рисунок 2.7 – Приклад побудови зображення додатною лінзою для розташування предмету 1, 2, 3

Позначаємо на ескізі ОС параметри які задані для предмету



2. Визначаємо зображення точки В.





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

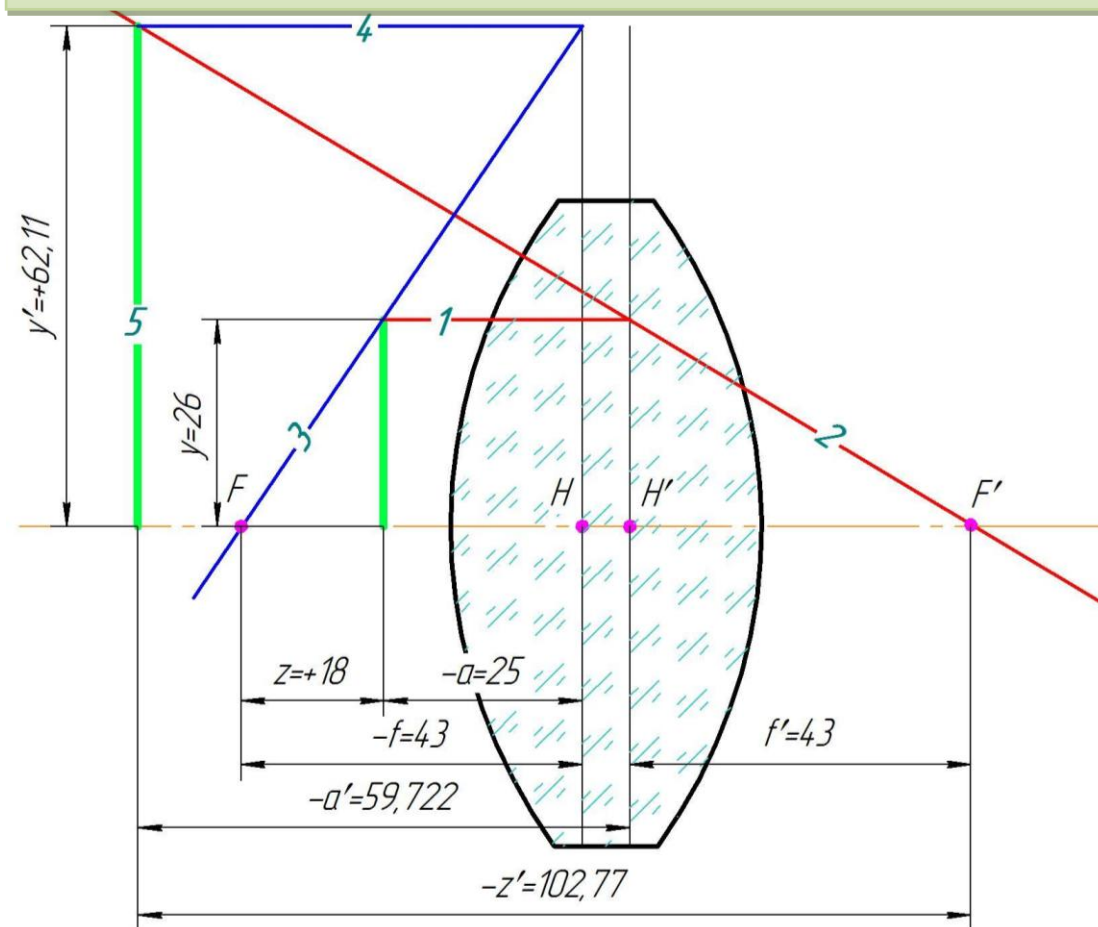
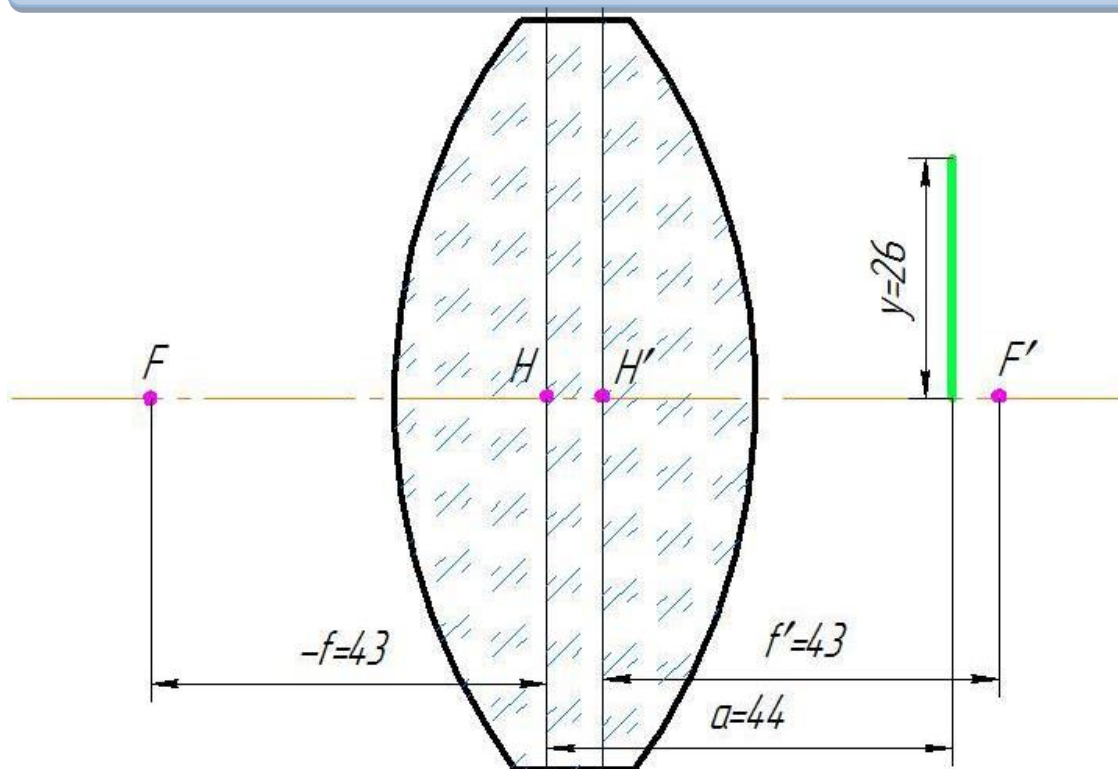
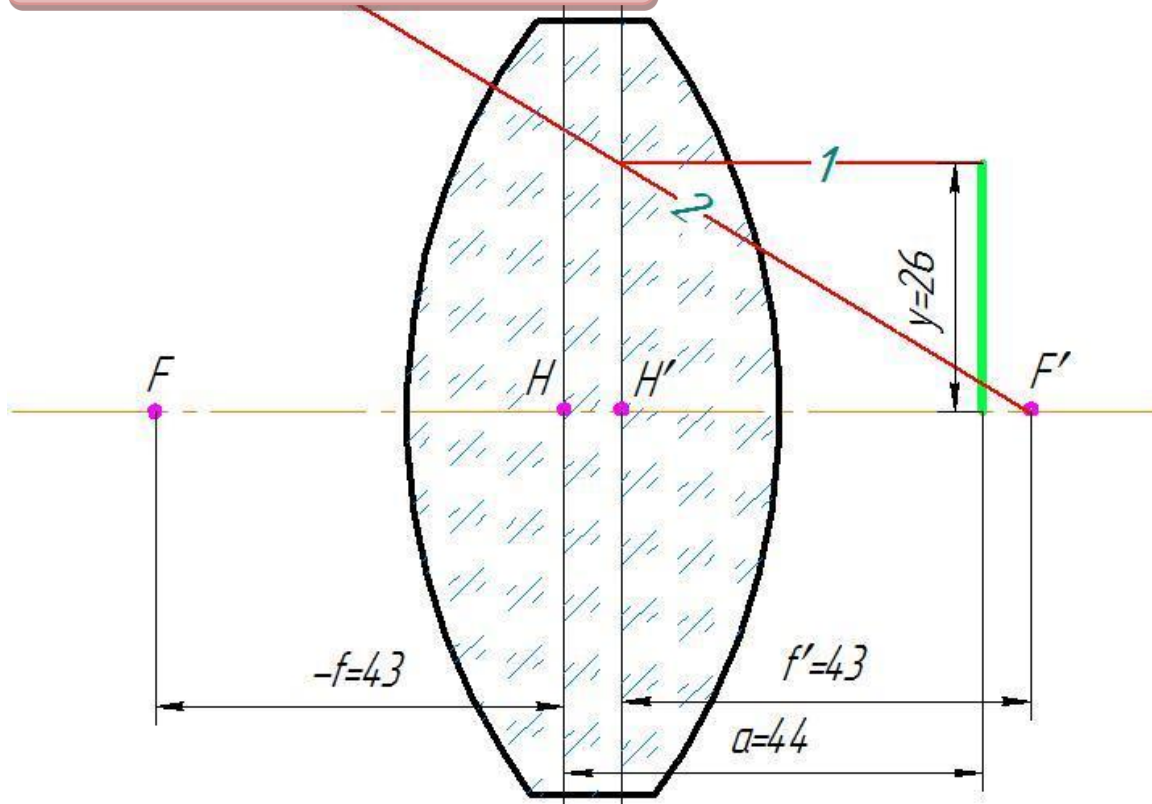


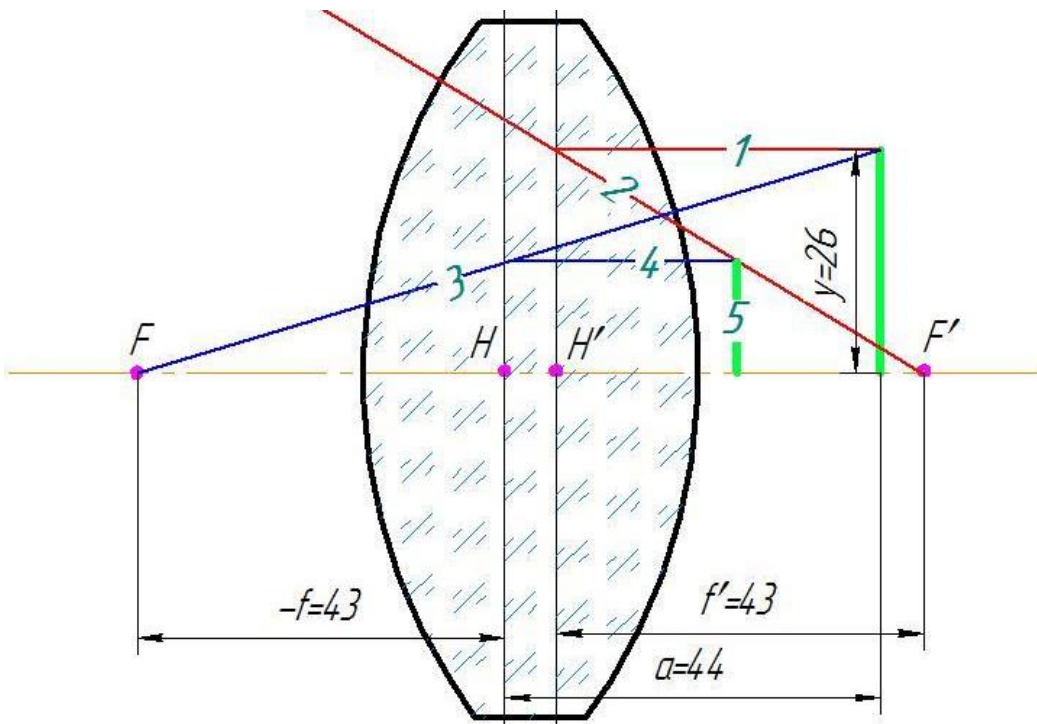
Рисунок 2.8 – Приклад побудови зображення додатною лінзою для розташування предмету 4

Позначаємо на ескізі ОС параметри які задані для



2. Визначаємо зображення точки В.





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

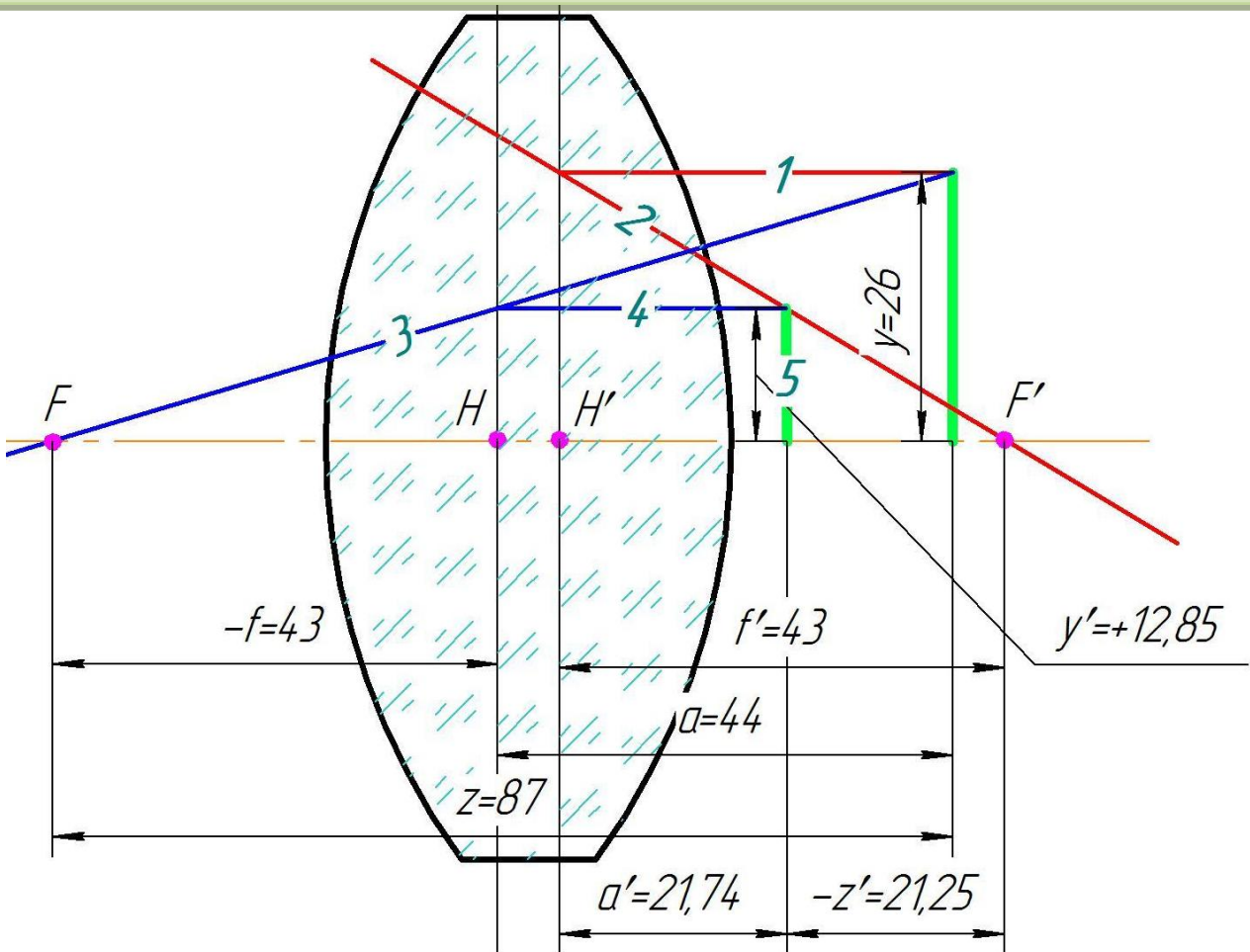


Рисунок 2.9 – Приклад побудови зображення додатною лінзою для розташування предмету 5

Приклад 2. Побудова зображення лінзою від'ємною в залежності від відстані до предмету

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

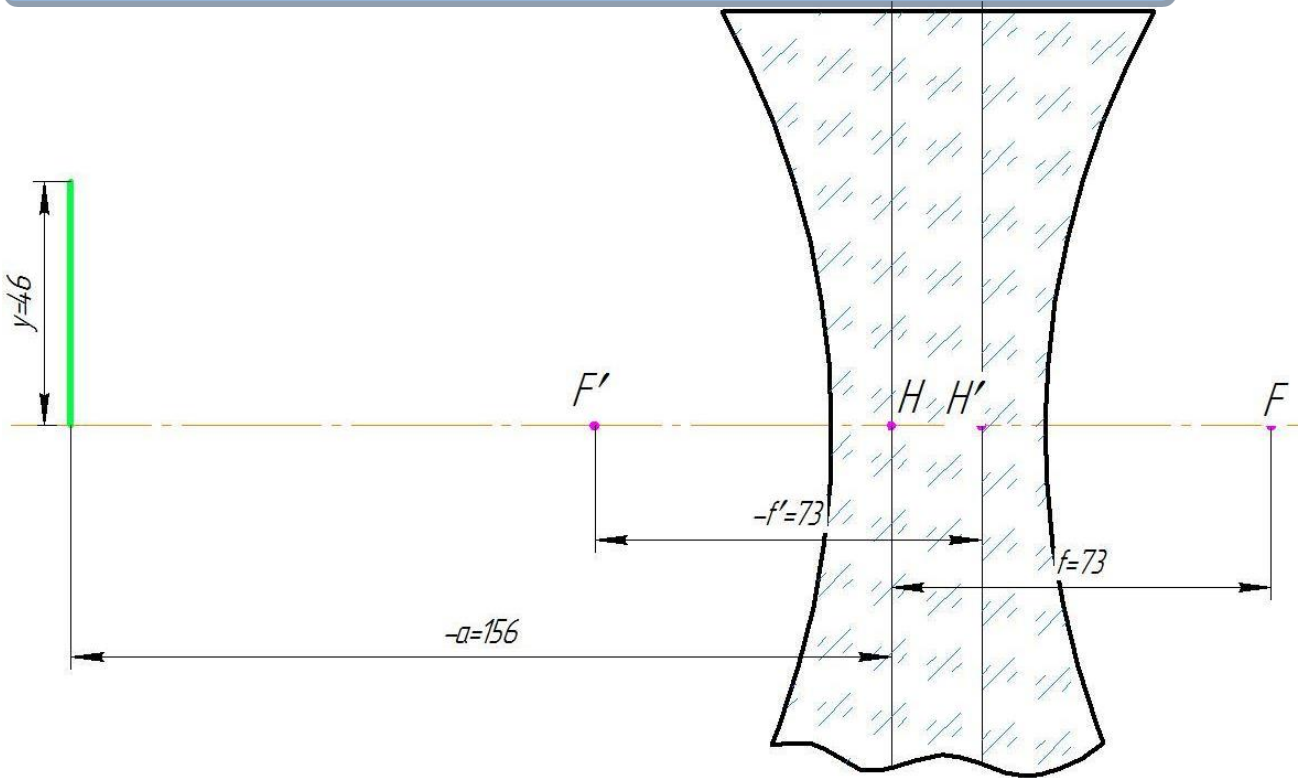
Таблиця 2.2 – Результати розрахунку від'ємної лінзи в залежності від відстані до предмету

предмет		1	2	3	4	5
дан о	a	-156	-146	-136	-53	43,6
	f'	-73				
	y	46				
роз рах унк ові 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
	$y' = \beta \cdot y = -26\text{мм}$	+14,66	+15,333	+16,06	+26,65	+114,21
рисунок		2.10			2.11	2.12

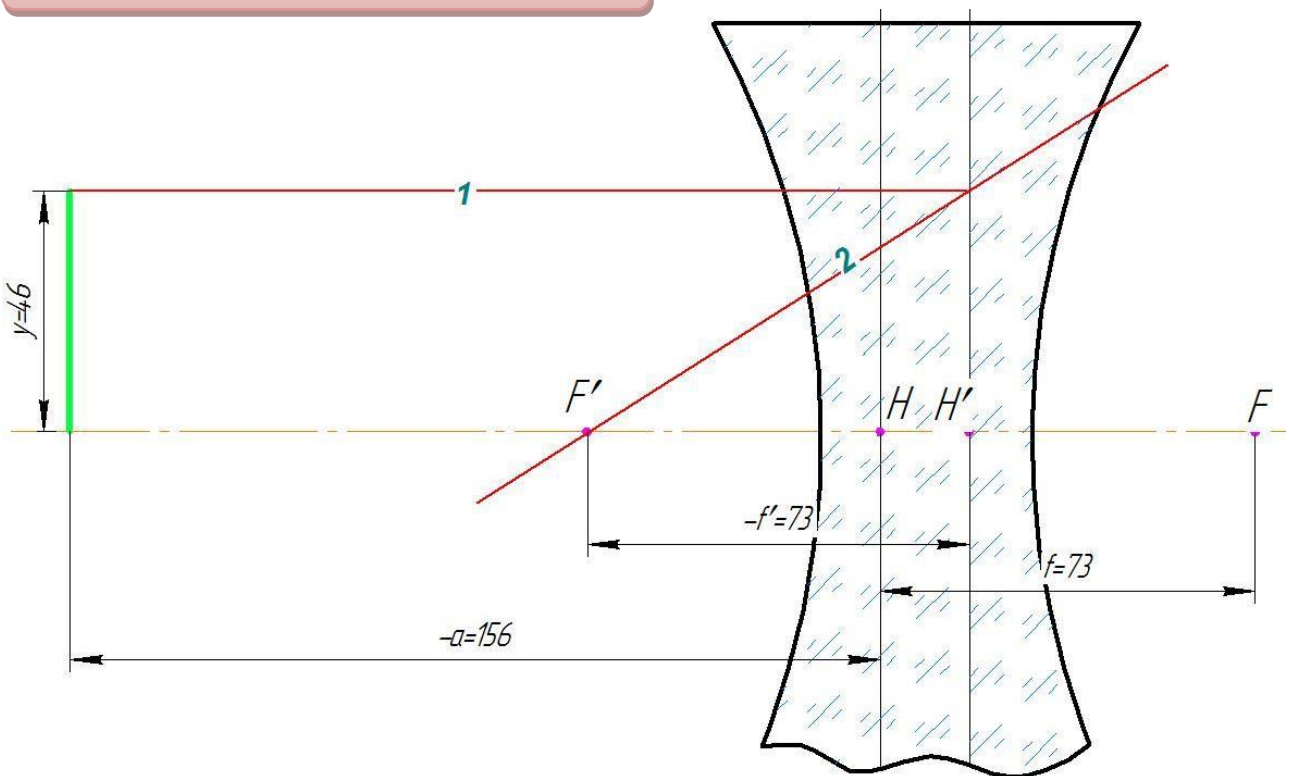
*Примітка

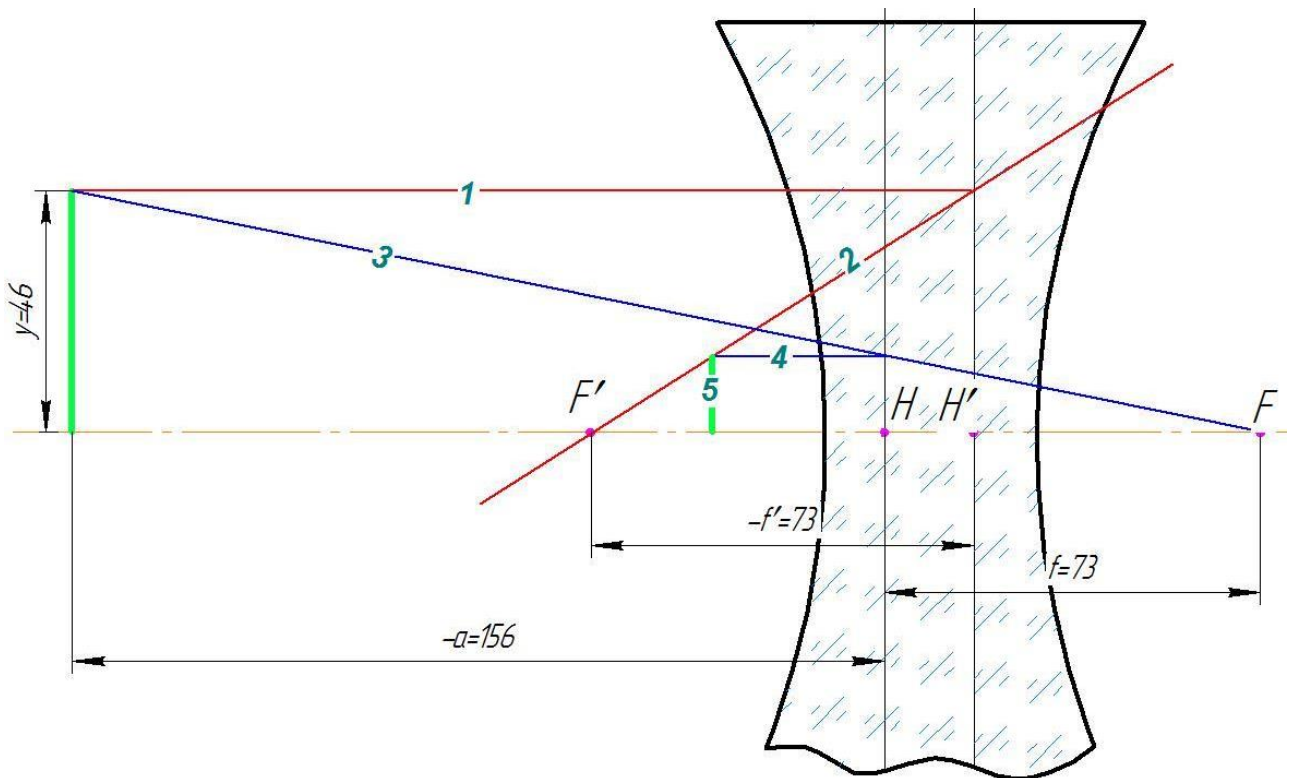
1. Знак z, z' при побудові визначається відносно фокуса.
2. Знак a, a' при побудові визначається відносно головних площин.
3. На рисунках порядок (послідовність) побудови променів подано цифрами 1, 2, 3 і т.д.
4. Приклад розрахунку в ППК MathCAD подано в додатку Г.

Позначаємо на ескізі ОС параметри які задані для предмету 1



2. Визначаємо зображення точки В.





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

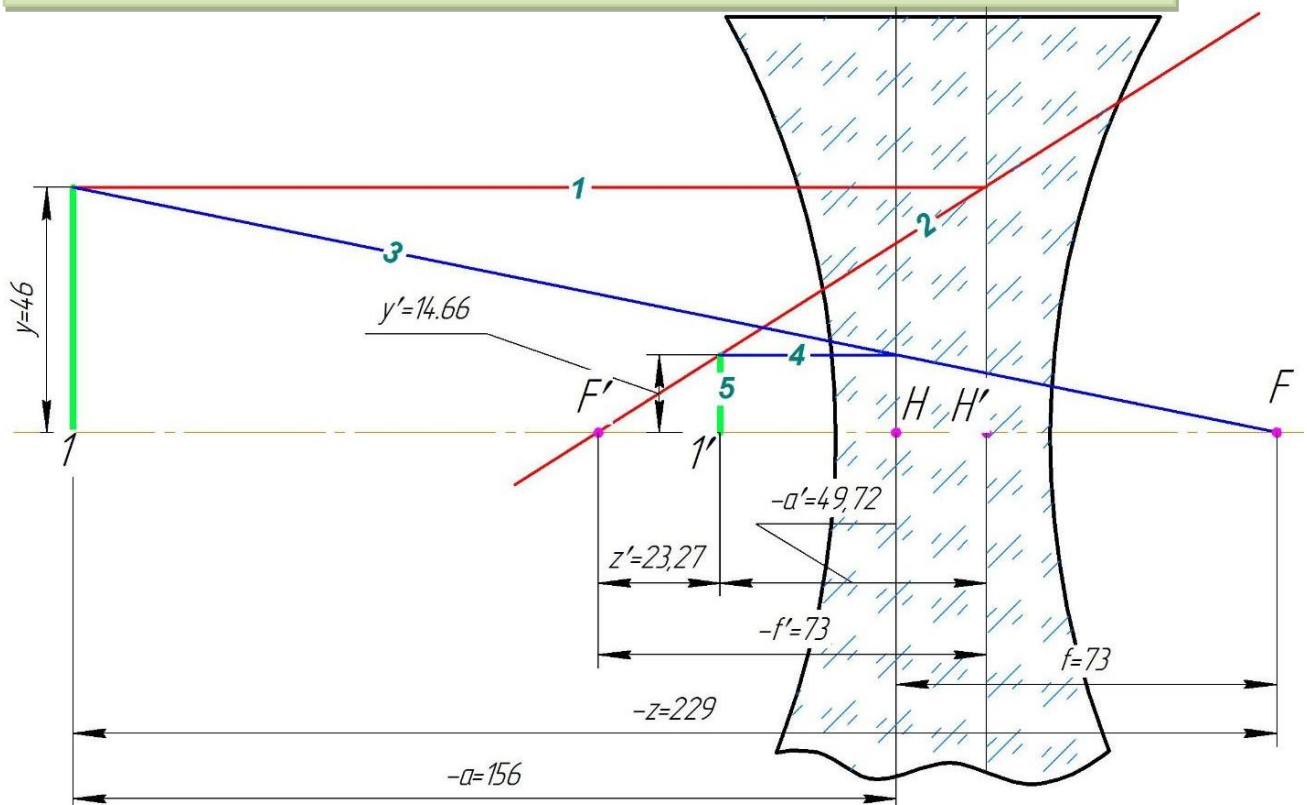
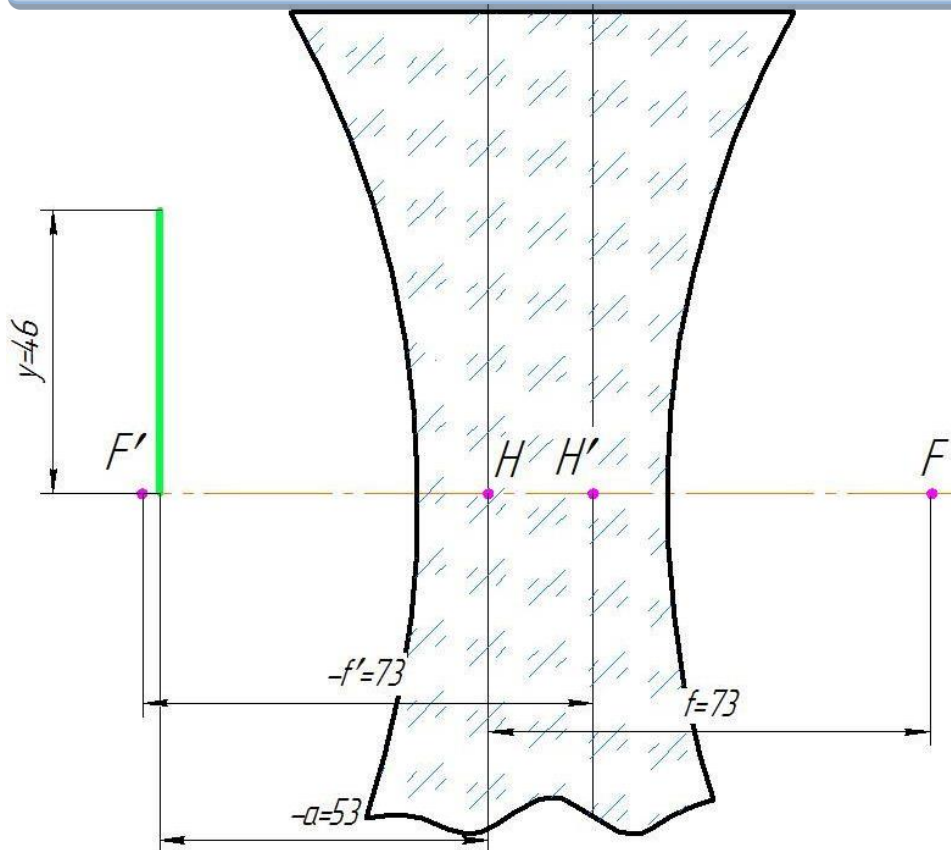
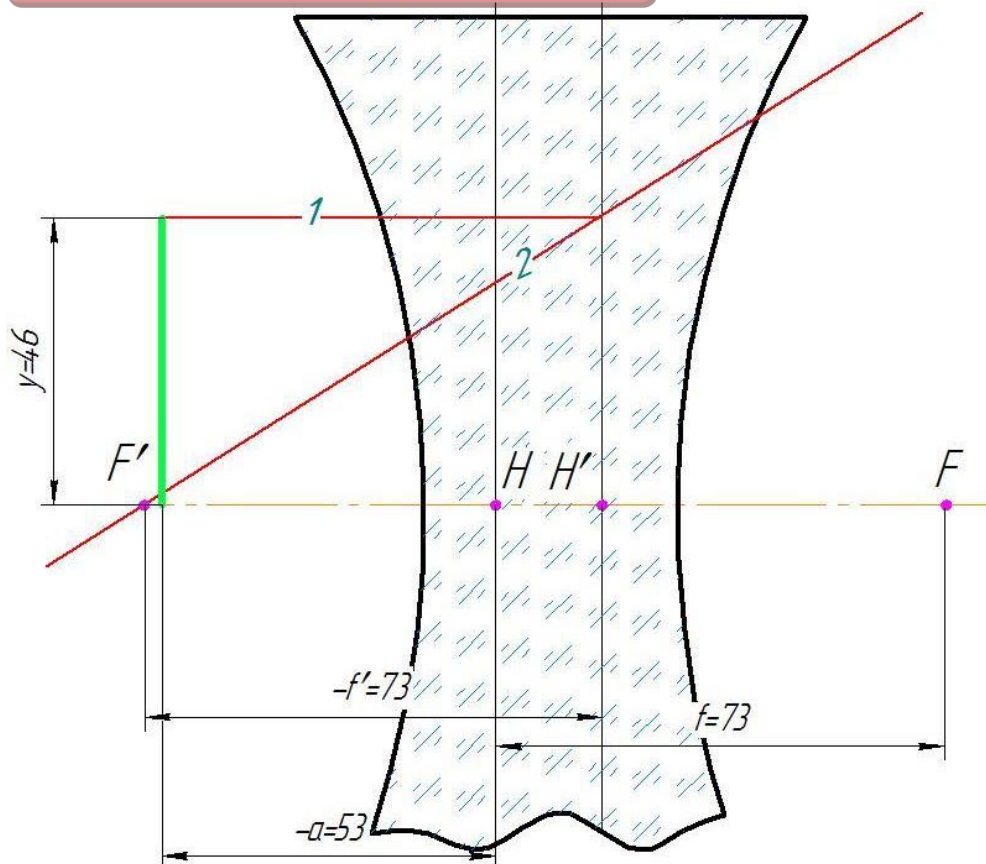


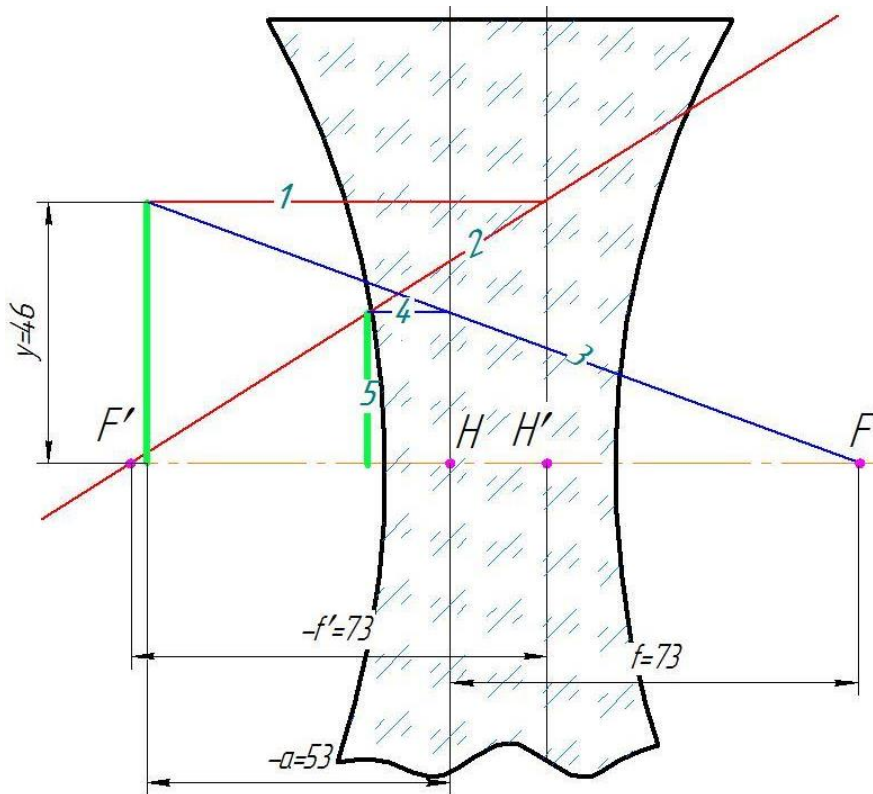
Рисунок 2.10 – Приклад побудови зображення від'ємною лінзою для розташування предмету 1, 2, 3

Позначаємо на ескізі ОС параметри які задані для предмету



2. Визначаємо зображення точки В.





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

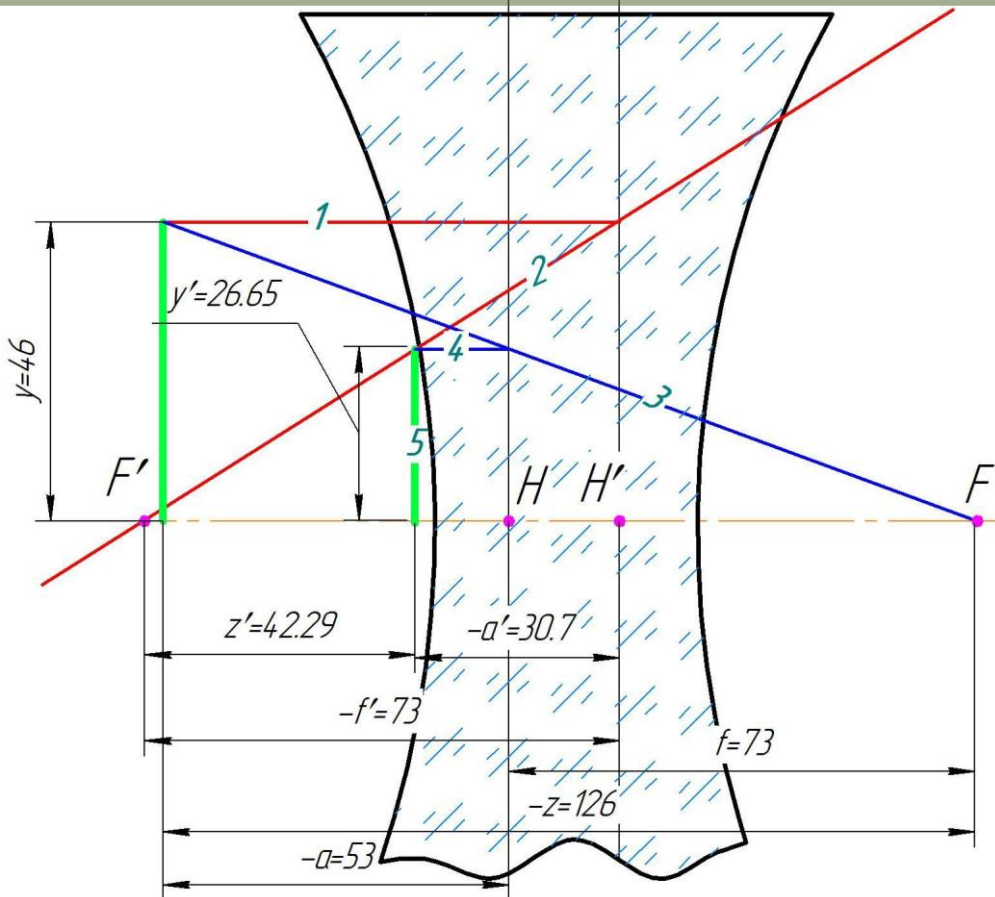
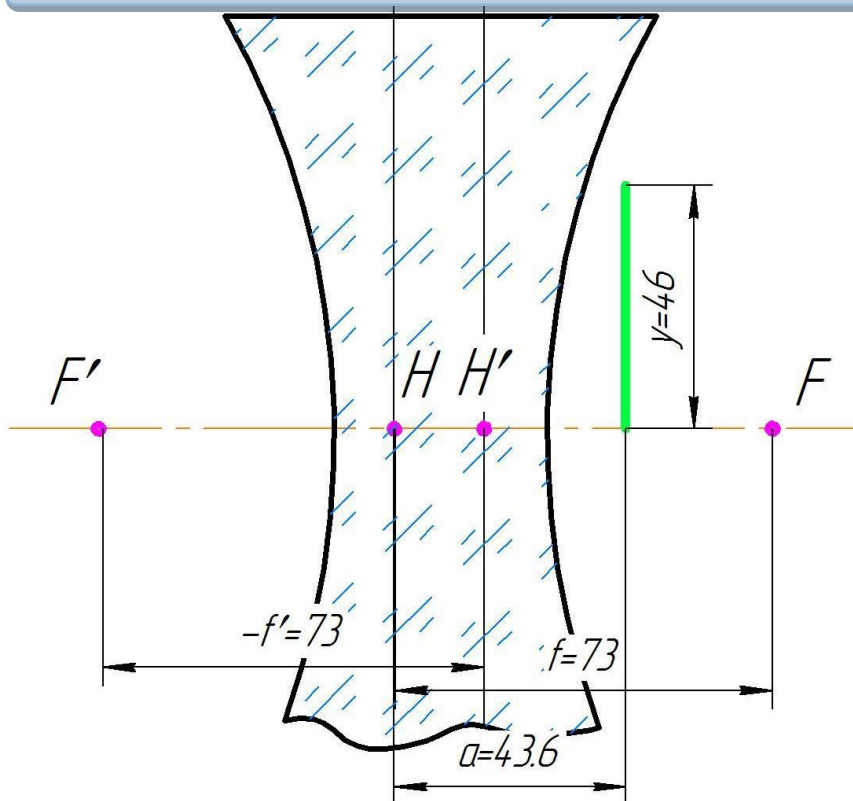
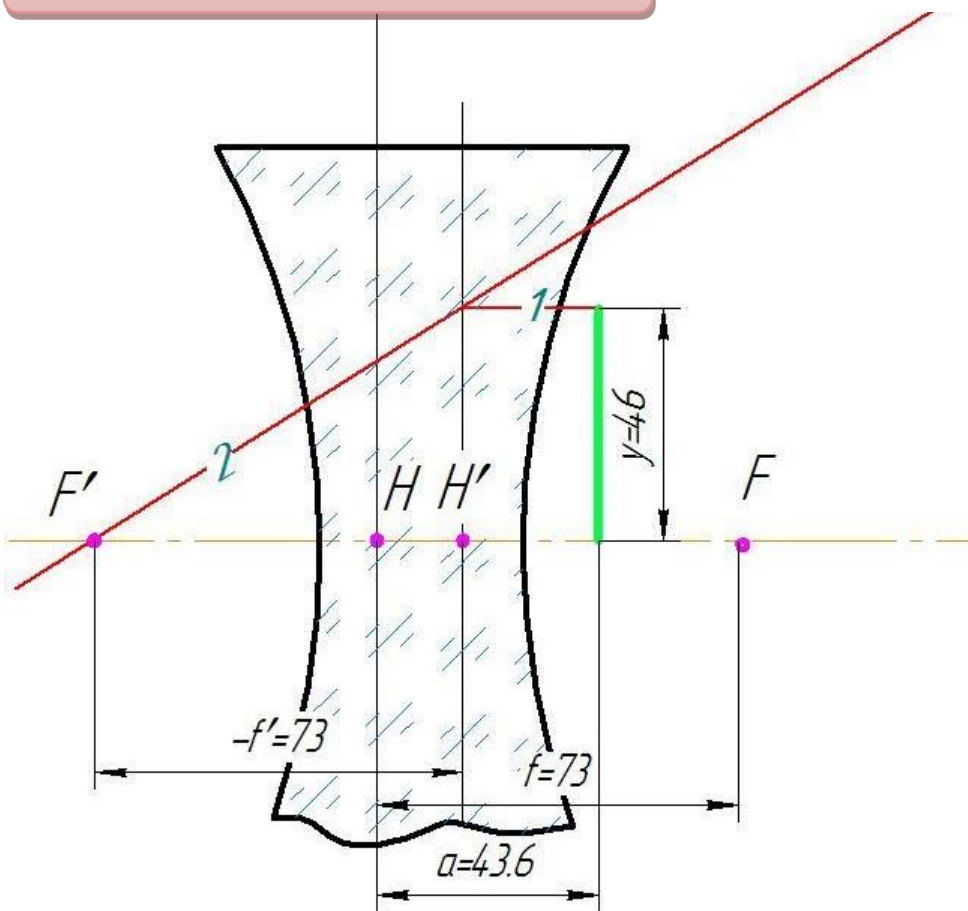


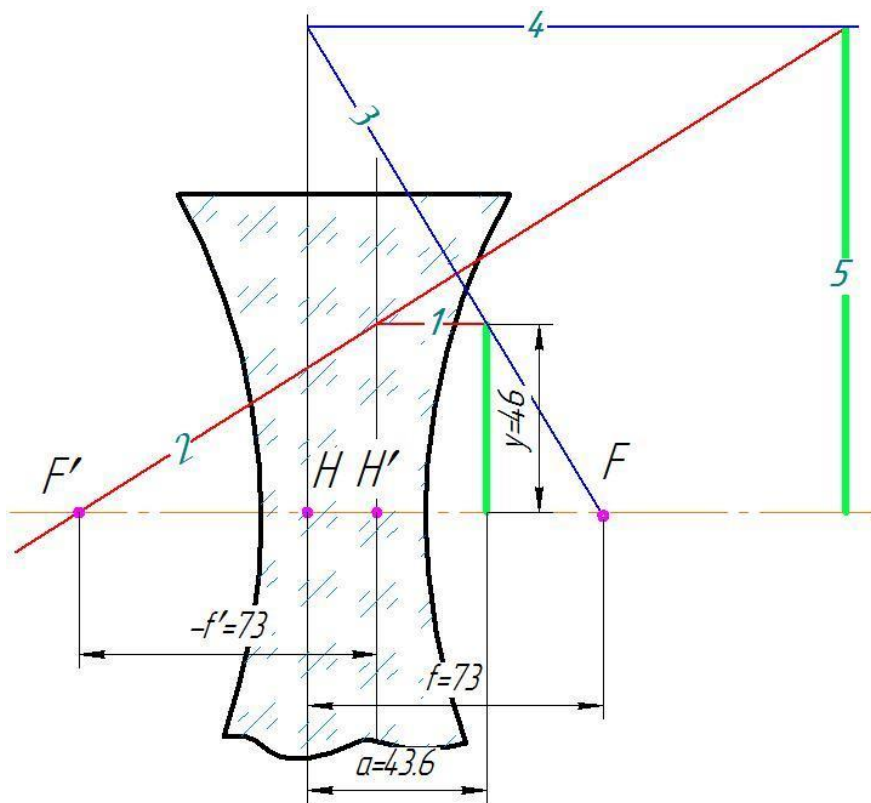
Рисунок 2.11 – Приклад побудови зображення від'ємною лінзою для розташування предмету 4

Позначаємо на ескізі ОС параметри які задані для предмету



2. Визначаємо зображення точки В.





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

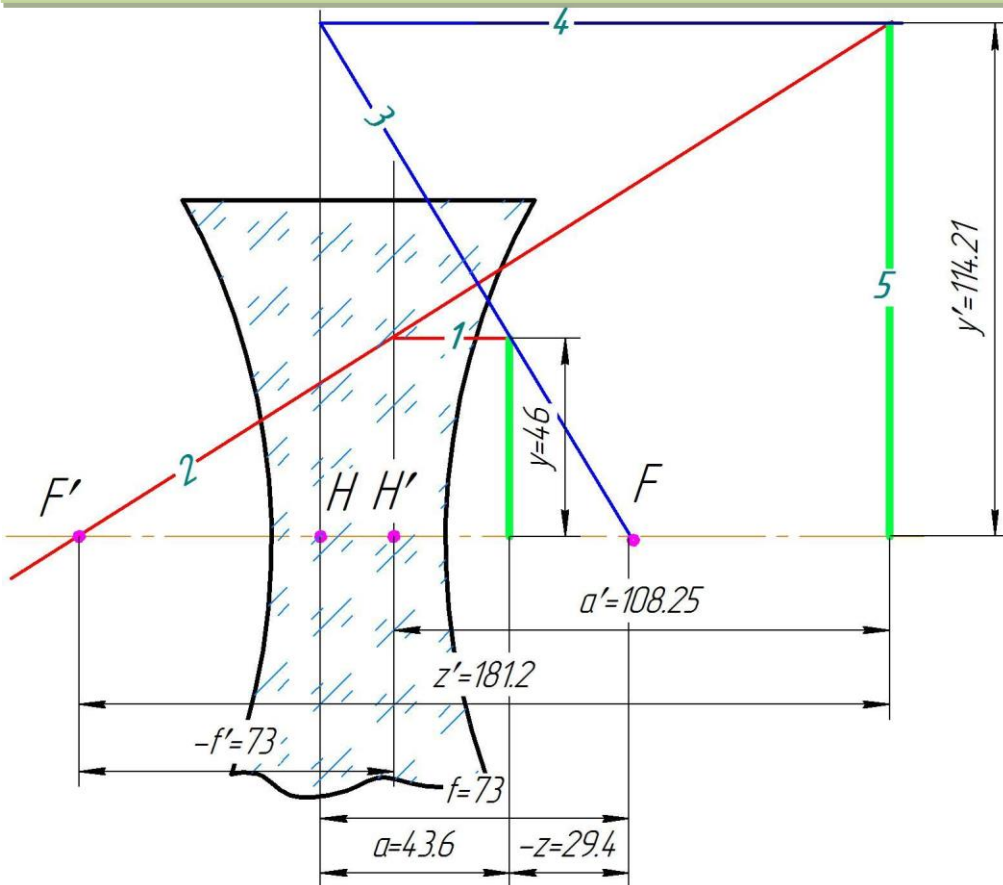


Рисунок 2.12 – Приклад побудови зображення від'ємною лінзою для розташування предмету 5

2.4 Параксіальні параметри лінз різних типів

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.

Конструктивним 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, справедливі наступні співвідношення [1-3, 6]:

$$f' = \frac{n \cdot r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}; \quad f = -\frac{n_1}{n'} \cdot f' \quad (2.16)$$

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, 6]:

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = \frac{(n-1)}{r_1} - \frac{(n-1)}{r_2} + \frac{(n-1)^2 \cdot d}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (2.17)$$

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

$$S_F = -f' \cdot \left(1 + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_2}\right); \quad S_{F'} = f' \cdot \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1}\right) \quad (2.18)$$

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:

$$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}; \quad S_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1} \quad (2.19)$$

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

$$S_H = S_F - f'; \quad S_{H'} = S_{F'} - f' \quad (2.20)$$

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

Відстань між головними площинами визначається рівністю [1-3, 6]:

$$\Delta_{HH'} = d + S_{H'} - S_H = d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n}\right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\right] \quad (2.21)$$

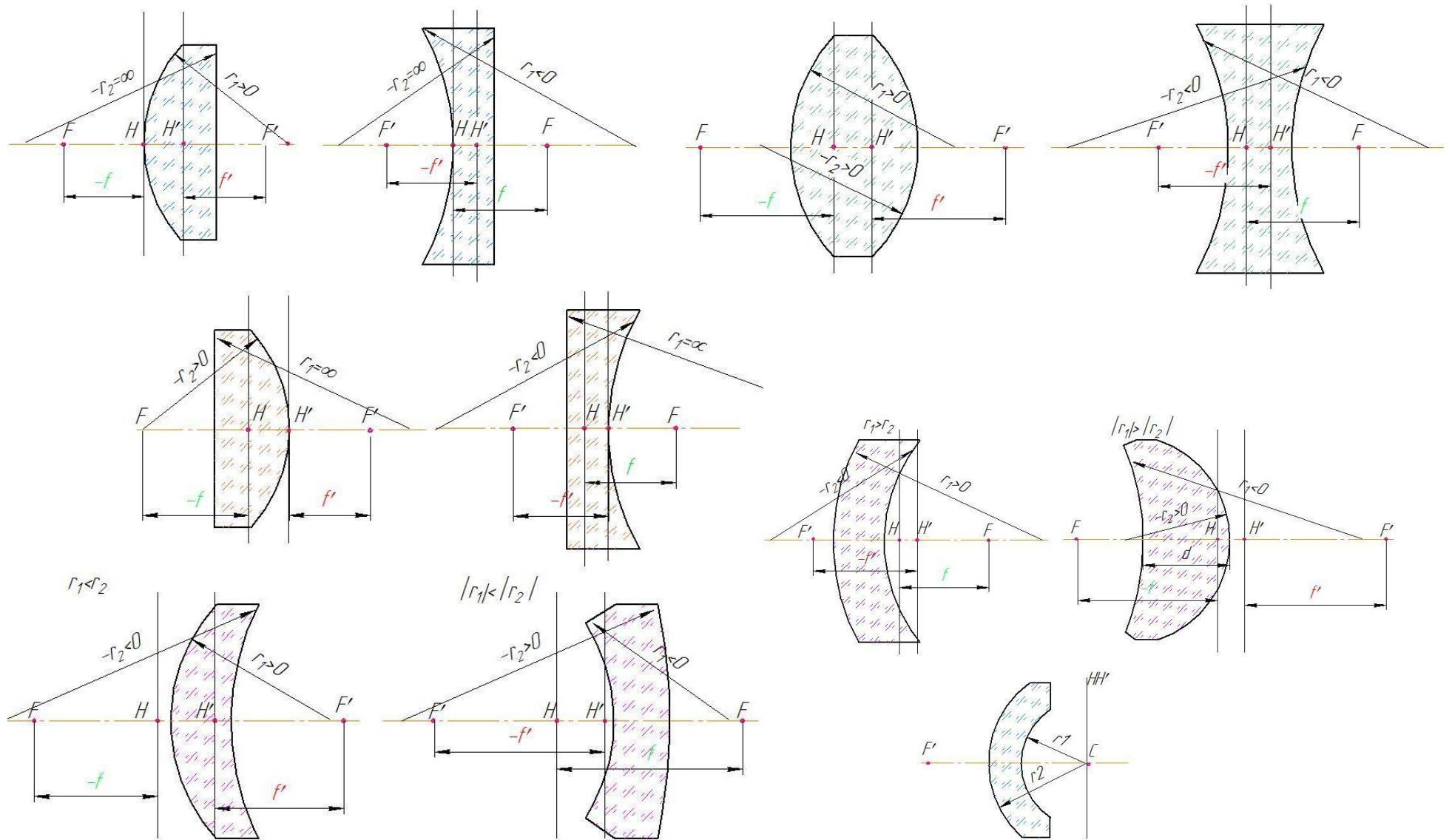


Рисунок 2.13 – Різновиди лінз [1-4, 6]

2.5 Матричний метод розрахунку кардинальних точок оптичної системи

Перетворення променя в оптичній системі зручно описувати за допомогою спеціальних матриць. Перевагами матричного методу у тому, що його можна використовувати не тільки в геометричній оптиці параксіальних променів, але і для опису розповсюдження гаусових пучків з дифракційним розходженням (лазерне випромінювання)

Параметри променя в просторі предметів і зображення можуть бути задані тільки в тому випадку, якщо вибрані опорні площини.

Опорна площина (ОП) – це деяка довільно вибрана площина, перпендикулярна до оптичної вісі.

Дія оптичної системи полягає в перетворенні координат променів:

$$\begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} \rightarrow (OC) \rightarrow \begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix}. \quad (2.22)$$

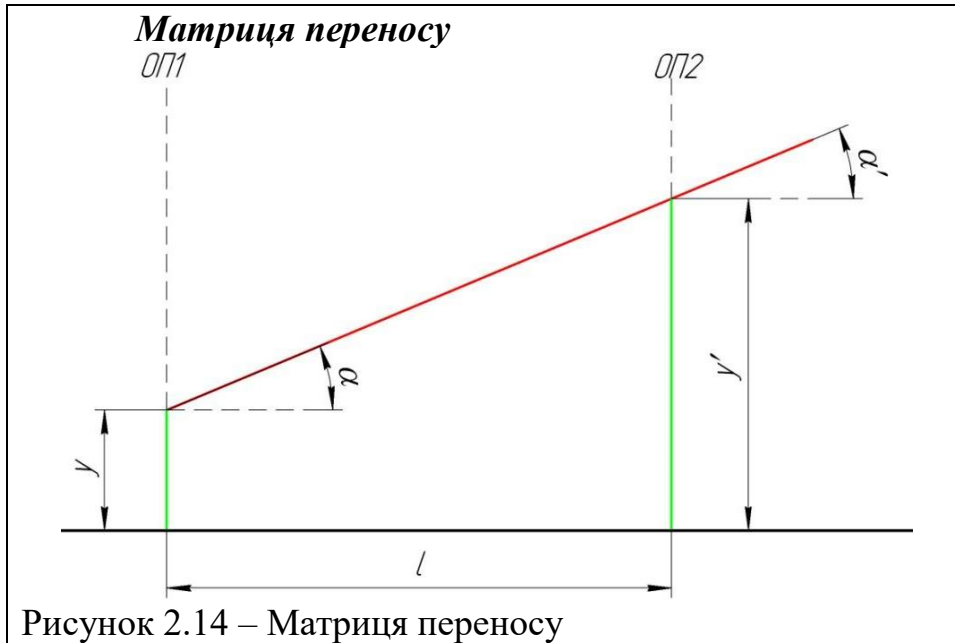
Для ідеальної оптичної системи:

$$\begin{aligned} y' &= A \cdot y + B \cdot V \\ V' &= C \cdot y + D \cdot V \end{aligned} \quad (2.23)$$

Матриця перетворення в загальному вигляді:

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

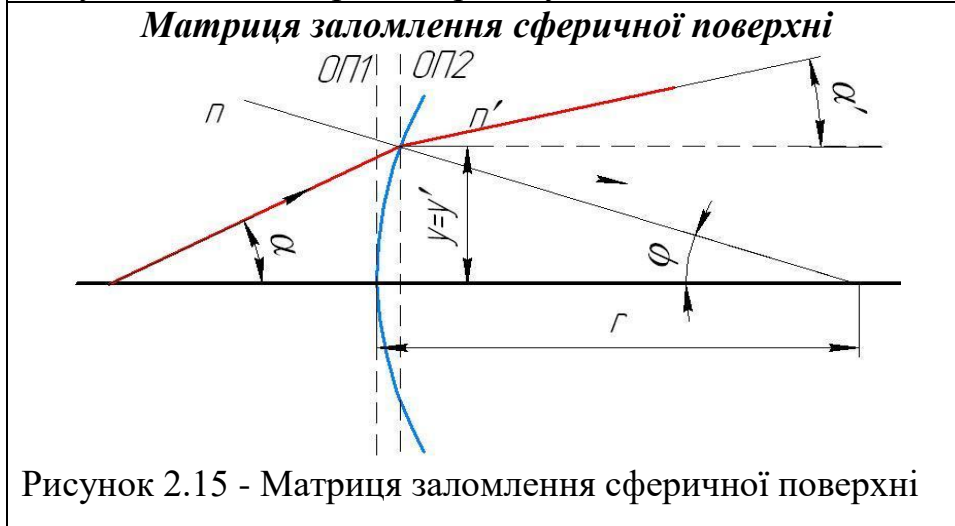
де $V = n \cdot \alpha$ - кутова координата.



Матриця переносу:

$$\mathfrak{Z} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

де $L = \frac{l}{n}$ - приведена товщина оптичного проміжку.
Тоді координати перетвореного променя для системи переносу зображення:

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = \mathfrak{Z} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} \quad (2.26)$$


Матриця заломлення сферичної поверхні має вигляд:

$$\mathfrak{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{r} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Тоді координати перетвореного променя для системи заломлення сферичної поверхні:

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n' - n}{r} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = \mathfrak{R} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

Матриця заломлення головних площин

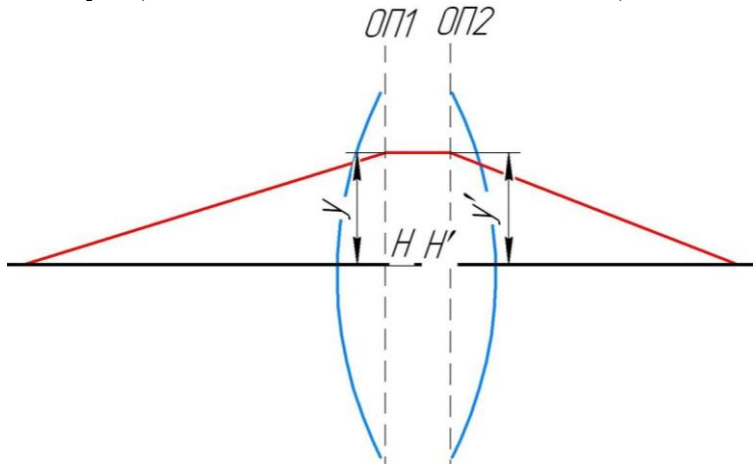


Рисунок 2.16 – Заломлення головних площин

Матриця заломлення головних площин:

$$\mathfrak{R} = M_H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Тоді координати перетвореного променя для системи заломлення головних площин:

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = \mathfrak{R} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Матриця лінзи

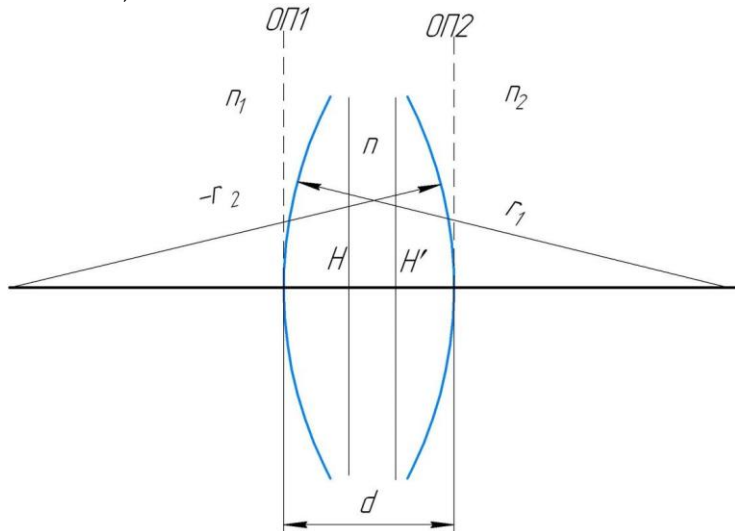


Рисунок 2.17 – Матриця лінзи

Матриця заломлення сферичних поверхонь:

$$\mathfrak{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{r_1} & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathfrak{R}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r_2} & 1 \end{pmatrix}$$

Матриця переносу між опорними площинами

$$\mathfrak{Z} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad L = \frac{d}{n}$$

Тоді координати перетвореного променя для системи лінза

$$M_{\text{лінзи}} = \mathfrak{R}_2 \cdot \mathfrak{T} \cdot \mathfrak{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{r_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P_1 \cdot L & L \\ -(P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \cdot L) & 1 - P_2 \cdot L \end{pmatrix}$$

$$P_2 = \frac{1-n}{r_2}; P_1 = \frac{n-1}{r_1}$$

(2.31)

Для тонкої лінзи $L \rightarrow 0$

$$M_{\text{лінзи}} = \mathfrak{R}_2 \cdot \mathfrak{T} \cdot \mathfrak{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{r_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P_1 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(P_1 + P_2) & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \quad \text{при} \quad (P_1 + P_2) = \frac{1-n}{r_2} + \frac{n-1}{r_1} = \frac{1}{f'}$$

(2.32)

Утворення зображення (тонка лінза)

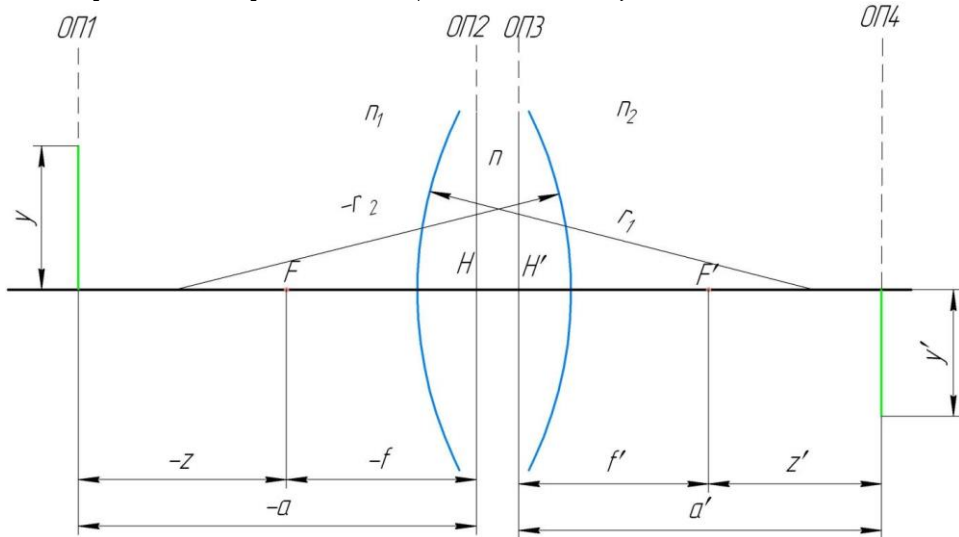


Рисунок 2.18 – Утворення зображення тонкою лінзою

Матриця утворення зображення тонкою лінзою

$$M = \mathfrak{T}_2 \cdot M_H \cdot \mathfrak{T}_1 = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

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

Тоді координати перетвореного променя для системи тонка лінза

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = (\mathfrak{S}_2 \cdot M_H \cdot \mathfrak{S}_1) \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix}$$

Утворення зображення (товста лінза)

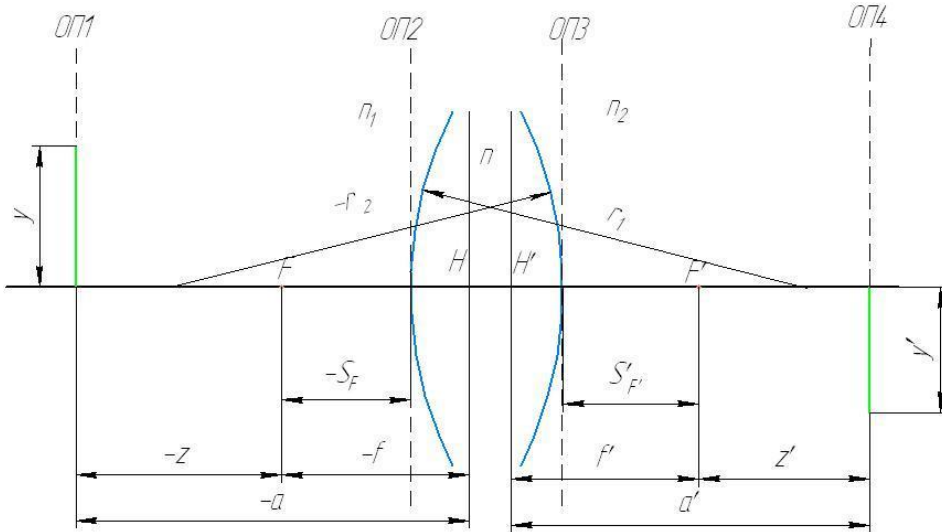


Рисунок 2.19 – Утворення зображення товстою лінзою

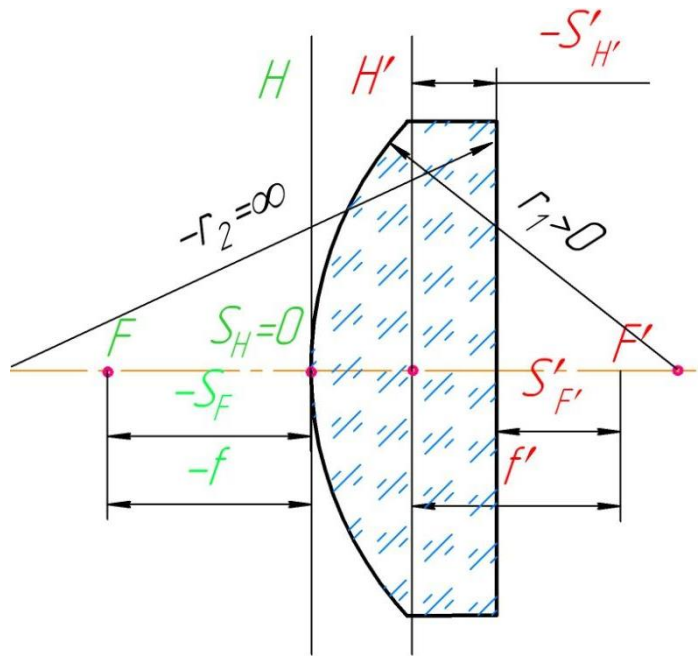
Матриця утворення зображення товстою лінзою

$$M = \mathfrak{S}_2 \cdot M_{\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{S}_1 =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & z' + S'_{F'} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot (M_{\text{лінзи}}) \cdot \begin{pmatrix} 1 & -(z + S_F) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$M_{\text{лінзи}}$ - матриця лінзи ф-ла (2.31);

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



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 $L = \frac{d}{n}$
- Параметри кривизни поверхні $P_2 = \frac{1-n}{r_2}; P_1 = \frac{n-1}{r_1}$

3. Записуємо матрицю лінзи

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

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

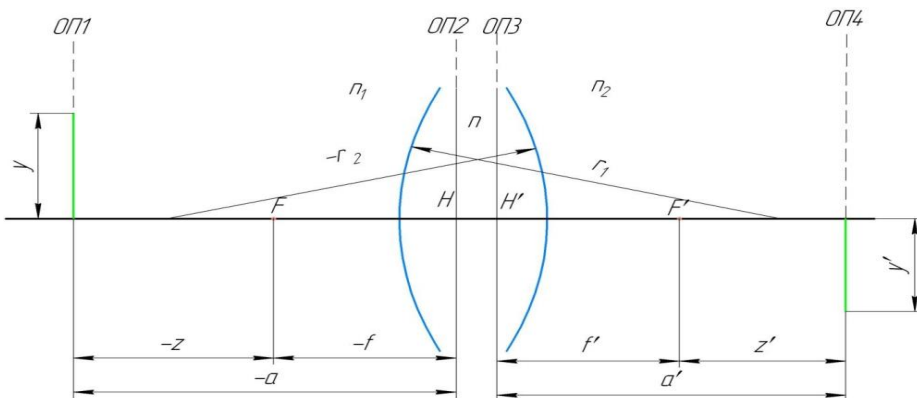
4. Розв'язуємо матрицю. Отримуємо матрицю коефіцієнтів

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

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 компоненту

$$M = \mathfrak{T}_1 \cdot M_H \cdot \mathfrak{T}_0 = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f' & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

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

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = (\mathfrak{S}_2 \cdot M_H \cdot \mathfrak{S}_1) \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix}$$

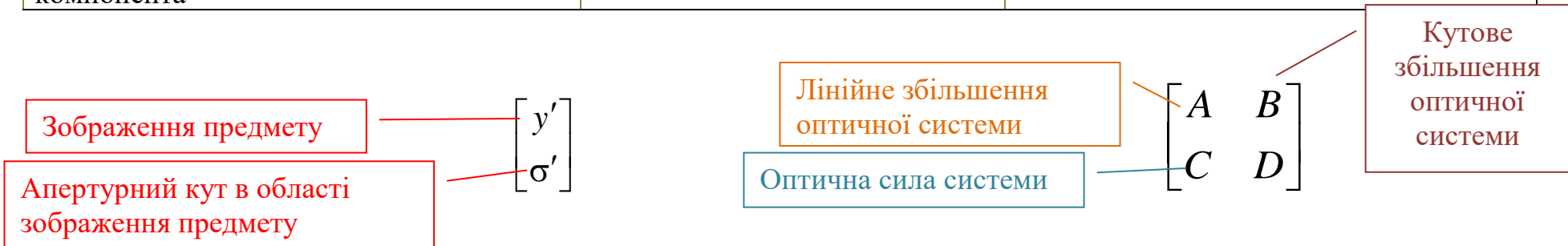
Тоді координати перетвореного променя для системи тонка лінза

2. 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

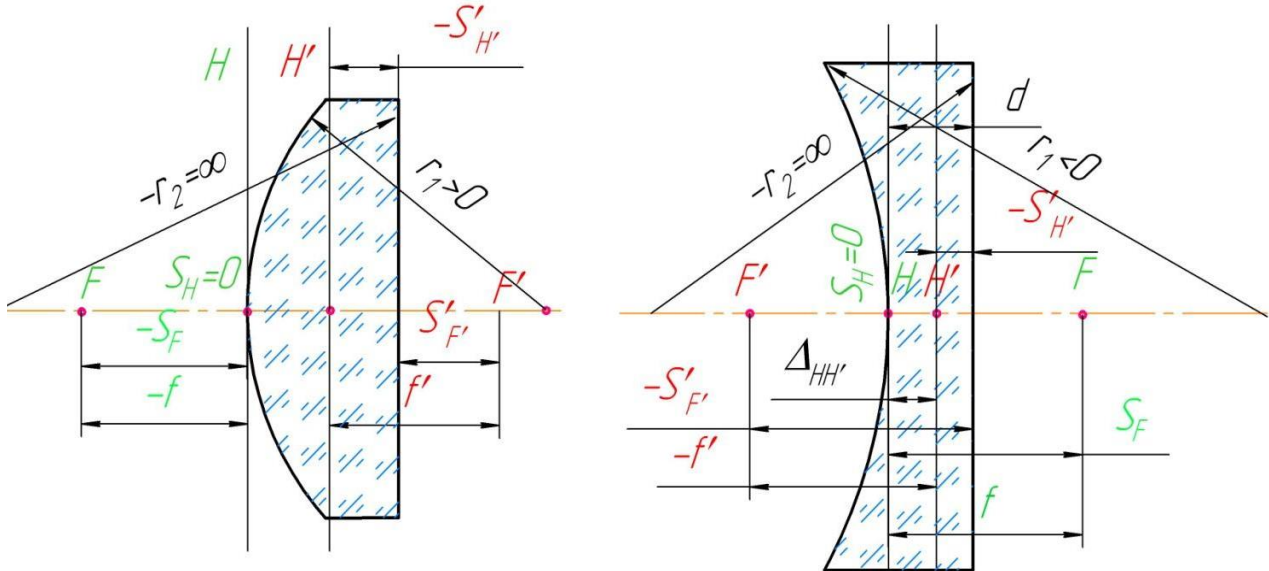
Розмір предмету	$y = 45 \text{ мм}$	* ff позначено для зручності, щоб відрізнити передню та задню фокусну відстань. Можливе будь-яке інше зручне для Вас позначення
Задня фокусна відстань оптичного компонента	$ff, \text{ мм}$	
Апертурний кут променю	$-\sigma = 20^\circ$	
Відстань від предмету до оптичного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



Приклад 3. Визначення параксіальних параметрів випукло-пласкої та ввігнуто-пласкої лінзи

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

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



Розрахункові формули	$r_1 = 30 \text{ мм}$	$r_1 = -30 \text{ мм}$
$f' = \frac{r_1}{(n-1)}$	39,936	-39,936
$f = -f'$	-39,936	39,936
S_H	0	0
$S_H = S_F - f$ перевірка	$-39,936 - 39,936 = 0$	$39,936 - 39,936 = 0$
$S'_{H'} = -\frac{d}{n}$	-1,142	-1,142
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ перевірка	$38,794 - 39,936 = -1,142$	$-41,078 - (-39,936) = -1,142$
$S_{F'} = -f$	-39,936	39,936
$S'_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	38,794	-41,078
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$	0,858	0,858
$y, \text{ мм}$	10	
n	1.7512	
Розташування предмету $k = 2.15$	$-a = k \cdot f =$ $2,15 \cdot (-39,936) =$ $-(-85,8624) \text{ мм}$	$-a = k \cdot f =$ $2,15 \cdot (39,936) =$ $85,8624 \text{ мм}$

Приклад розрахунку в ППК MathCAD наведено в додатку Г

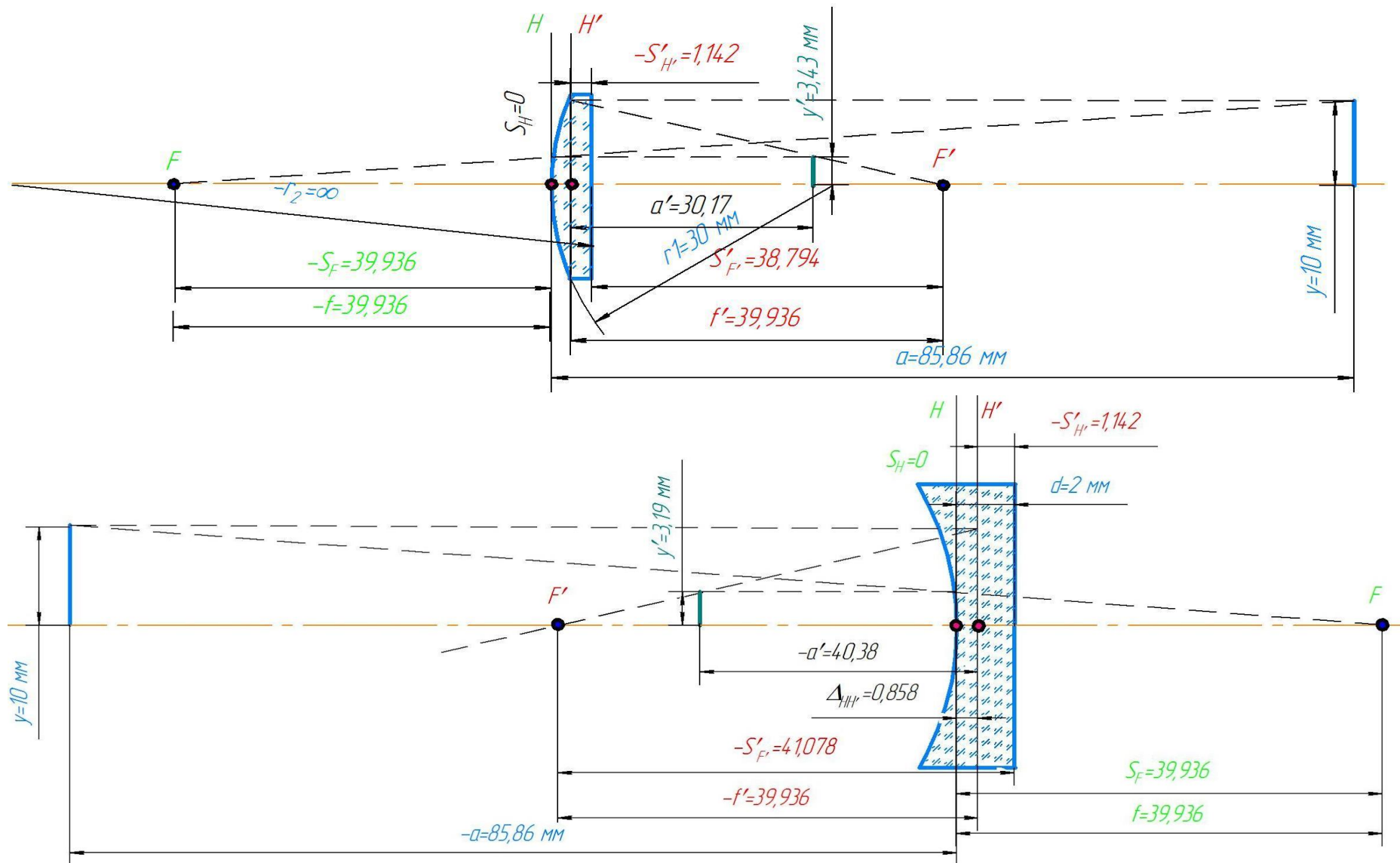
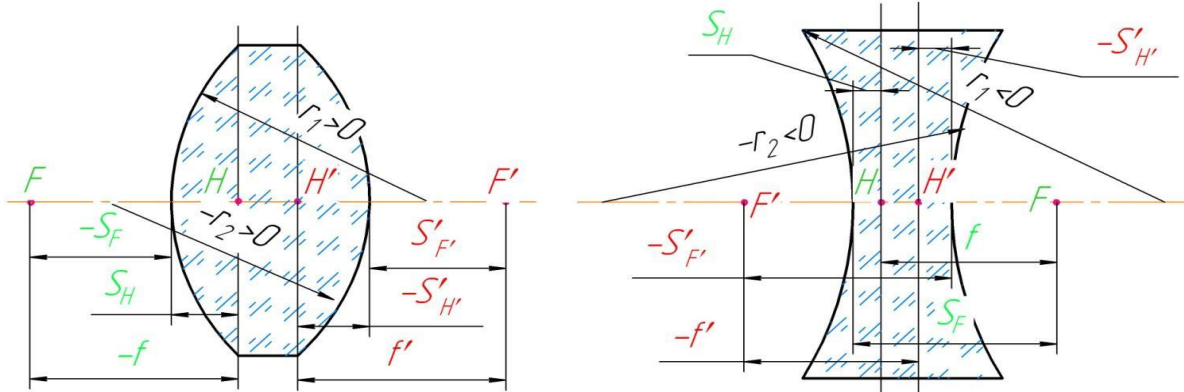


Рисунок 2.20 - Основні параметри випукло-поскої та ввігнуто-поскої лінзи до прикладу 3

*Примітка. На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку

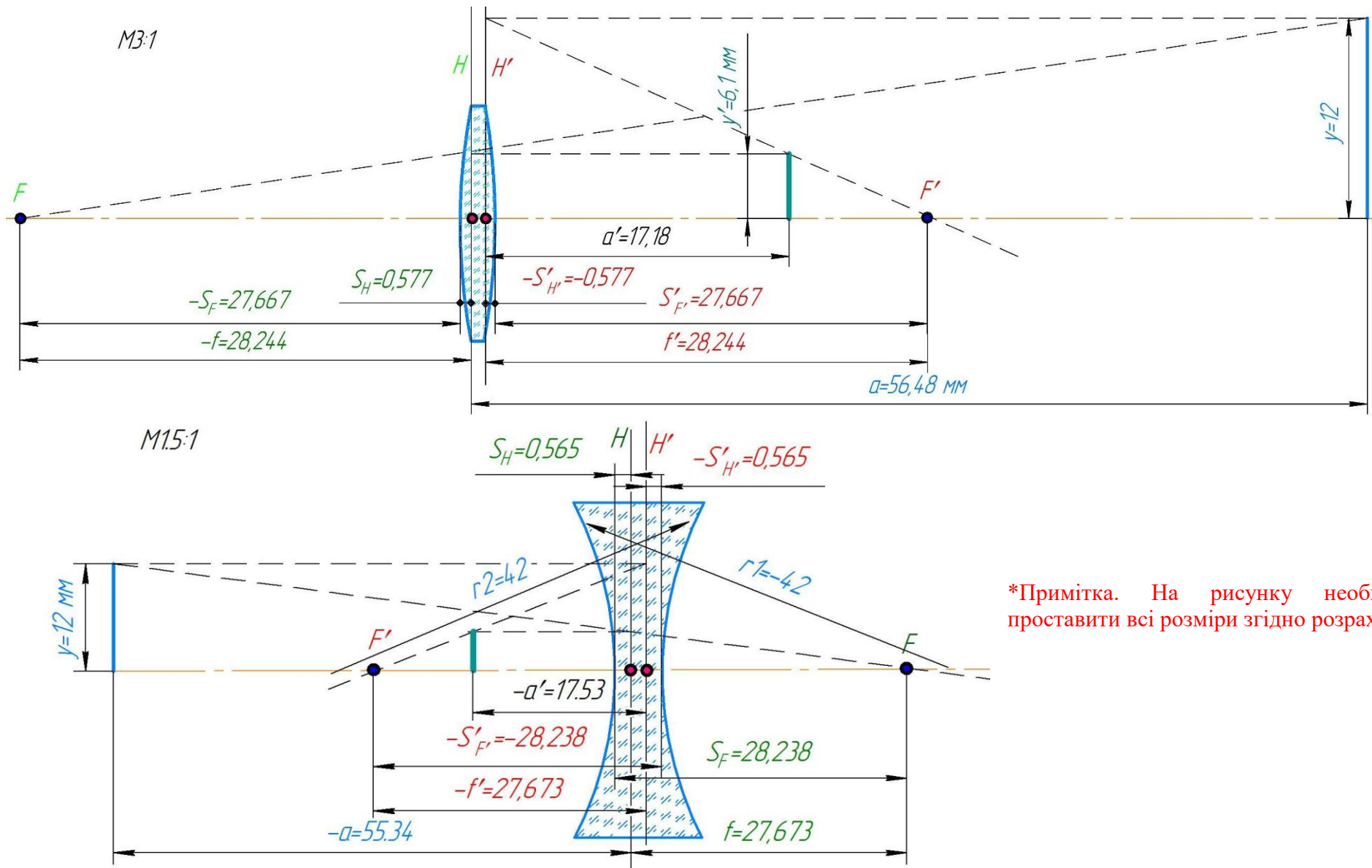
Приклад 4. Визначення параксіальних параметрів подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи

Розрахувати основні параметри подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані.



Розрахункові формули	$r_1=42 \text{ мм}; r_2=-42 \text{ мм}$	$r_1=-42 \text{ мм}; r_2=42 \text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	28,244	-27,673
$f = -f'$	-28,244	27,673
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	0,577	0,565
$S_H = S_F - f$ перевірка	$-27,667 - (-28,244) = 0,577$	$28,238 - 27,673 = 0,565$
$S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	-0,577	-0,565
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ перевірка	$27,667 - 28,277 = -0,577$	$-28,238 - (-27,673) = -0,565$
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-27,667	28,238
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	27,667	-28,238
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0,846	0,869
$y, \text{ мм}$	12	
n	1,7512	
Розташування предмету $k = 2$	$-a = k \cdot f =$ $2 \cdot (-28,244) =$ $-56,488 \text{ мм}$	$-a = k \cdot f =$ $2 \cdot (27,673) =$ $= 55,346 \text{ мм}$

Приклад розрахунку в ППК MathCAD наведено в додатку Г

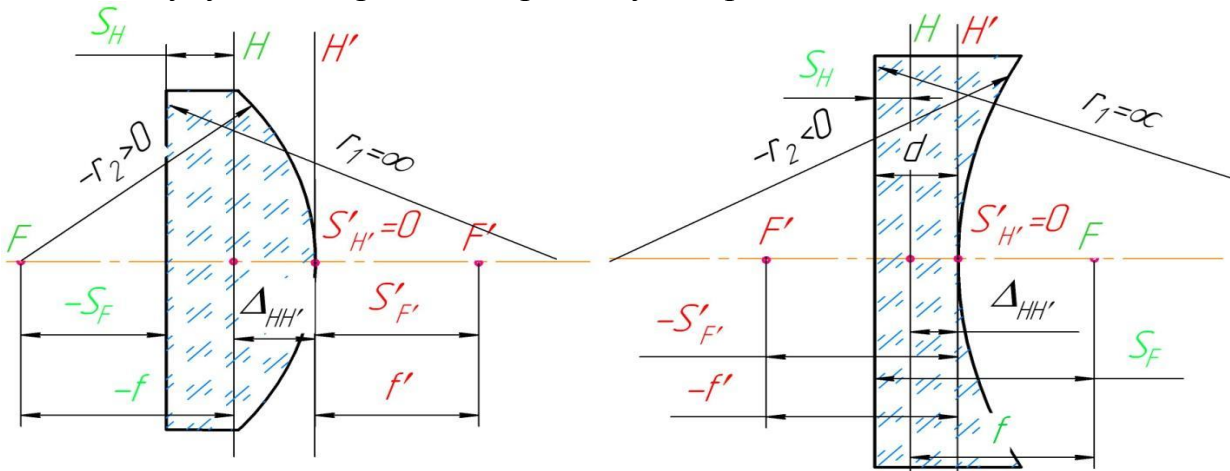


*Примітка. На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку

Рисунок 2.21 – Основні параметри подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи до прикладу 4

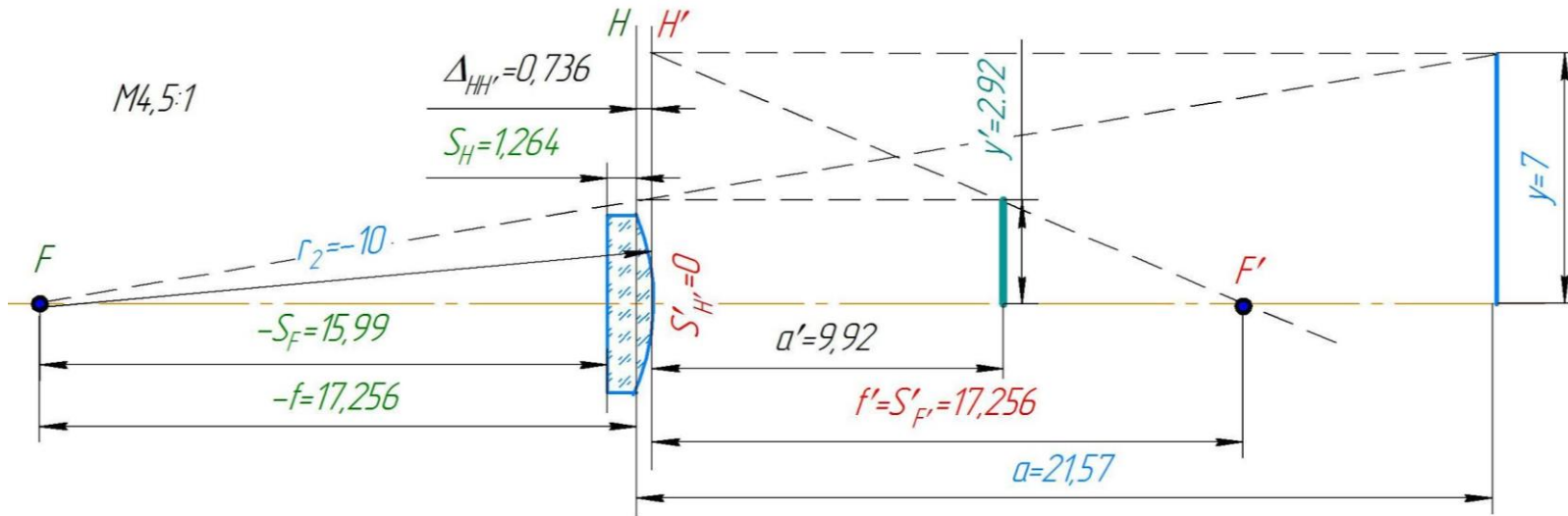
Приклад 5. Визначення параксіальних параметрів плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи

Розрахувати основні параметри плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані.



Розрахункові формули	r2=-10 мм	r2=10 мм
$f' = \frac{-r_2}{(n-1)}$	17,256	-17,256
$f = -f'$	-17,256	17,256
$S'_{H'}$	0	0
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ перевірка	17,256-17,256=0	-17,256-(-17,256)=0
$S_H = \frac{d}{n}$	1,266	1,266
$S_H = S_F - f$ перевірка	-15,99-(-17,256)=1,266	18,522-17,256=1,266
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-15,99	18,522
$S'_{F'} = f'$	17,256	-17,256
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$	0,734	0,734
y, мм	7	
n	1.5795	
Розташування предмету k = 1.25	-a = k · f = 1,25 · (-17,256) = = -21,57 мм	-a = k · f = 1,25 · (17,256) = = 21,57 мм

Приклад розрахунку в ППК MathCAD наведено в додатку Г



*Примітка. На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку

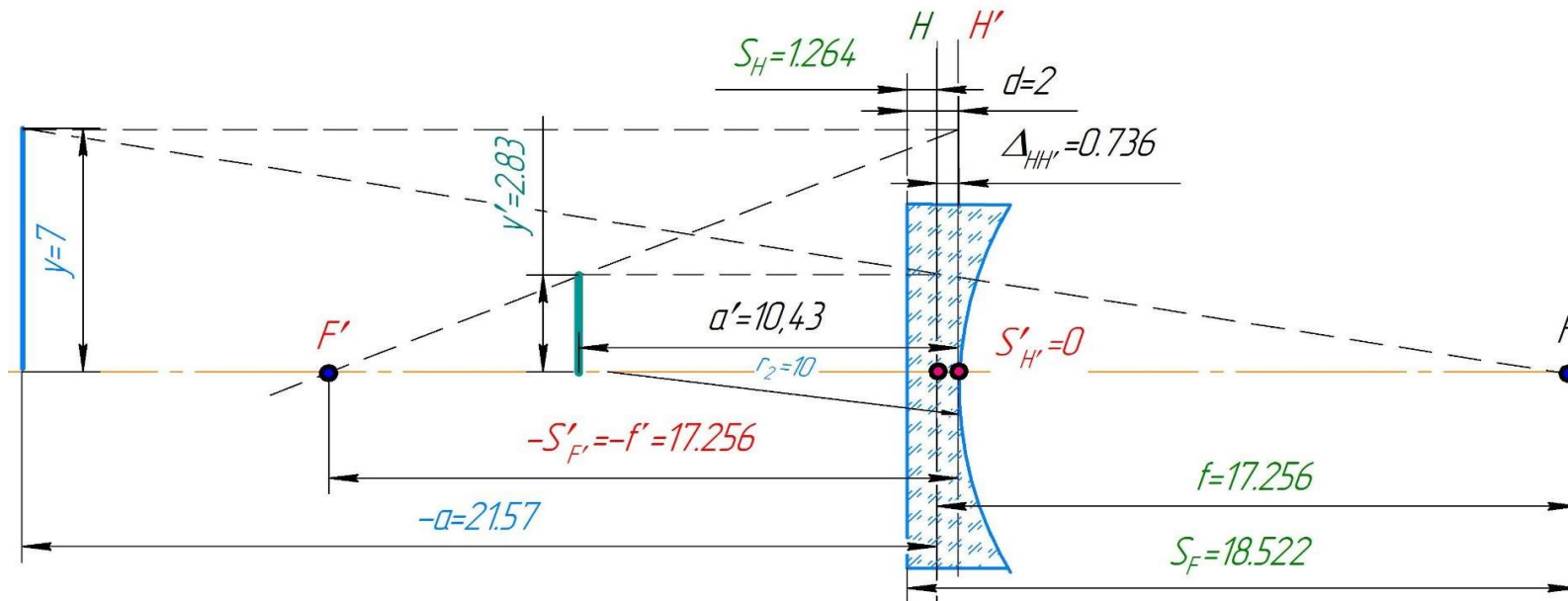
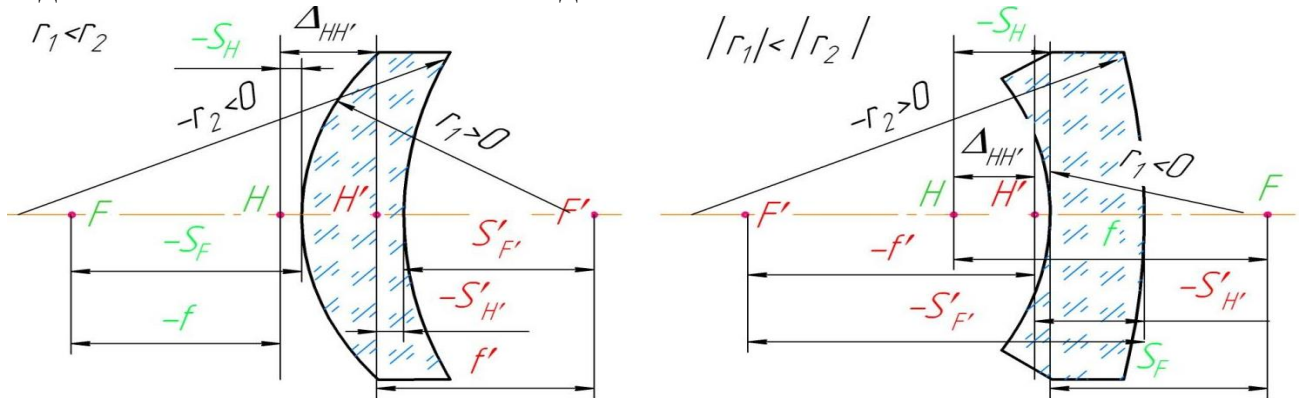


Рисунок 2.22 – Основні параметри плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи до прикладу 5

Приклад 6. Визначення параксіальних параметрів випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска.

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



Розрахункові формули	$r_1 = 10 \text{ мм}; r_2 = 20 \text{ мм}$	$r_1 = -10 \text{ мм}; r_2 = -20 \text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	29,011	-33,921
$f = -f'$	-29,011	33,921
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	-1,132	-1,323
$S_H = S_F - f$ перевірка	$-30,143 - (-29,011) = -1,132$	$32,598 - 33,921 = -1,323$
$S_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	-2,263	-2,646
$S_{H'} = S_{F'} - f'$ перевірка	$26,748 - 29,011 = -2,263$	$-36,567 - (-33,921) = -2,646$
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-30,143	32,598
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	26,748	-36,567
$\Delta_{HH'} = d + S_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0,868	0,677
$y, \text{ мм}$	7	
n	1,6395	
Розташування предмету $k = 0.55$	$-a = k \cdot f =$ $0.55 \cdot (-29.011) =$ $= -15,956 \text{ мм}$	$-a = k \cdot f =$ $0.55 \cdot (29.011) =$ $15,956 \text{ мм}$

Приклад розрахунку в ППК MathCAD наведено в додатку Г

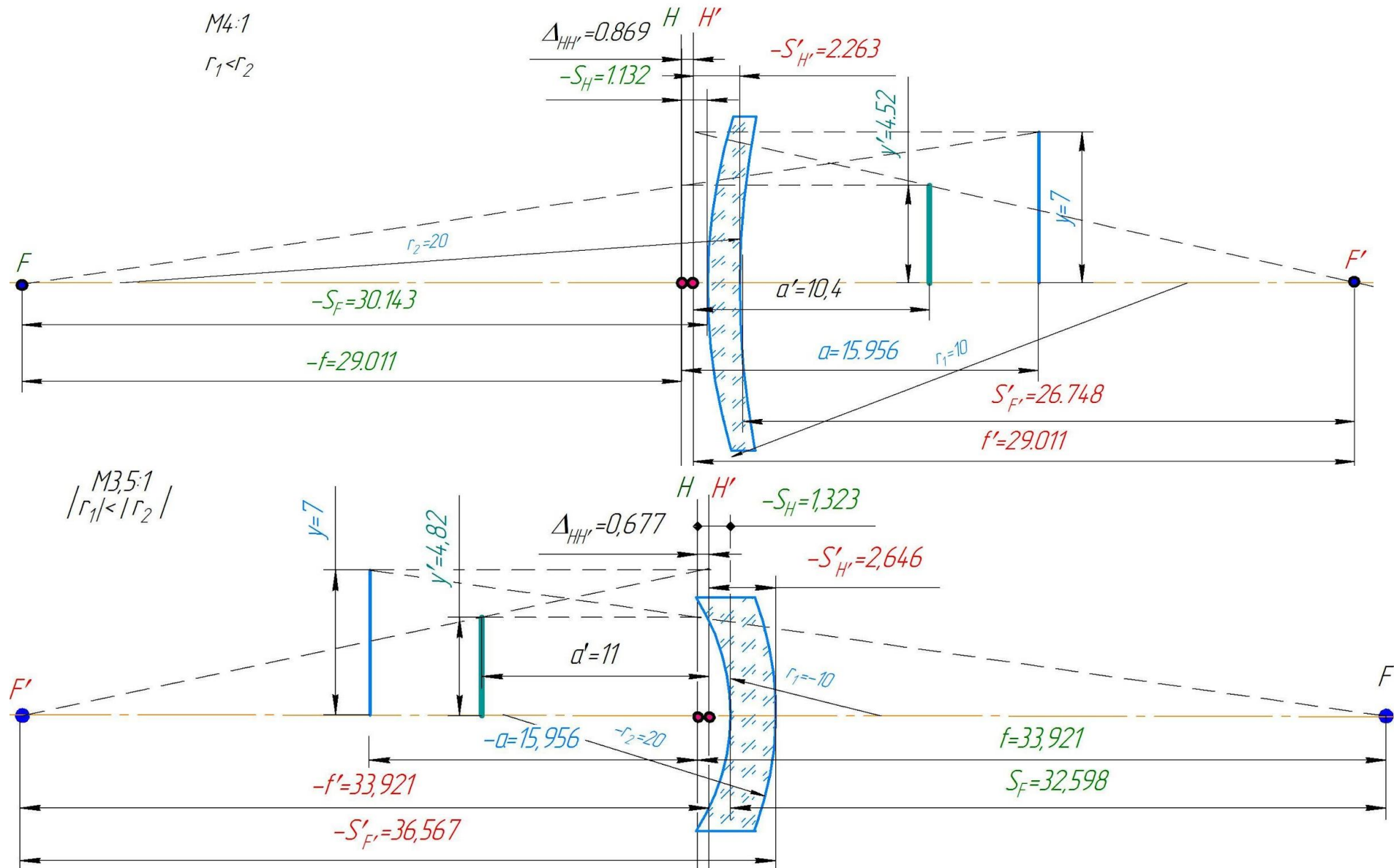
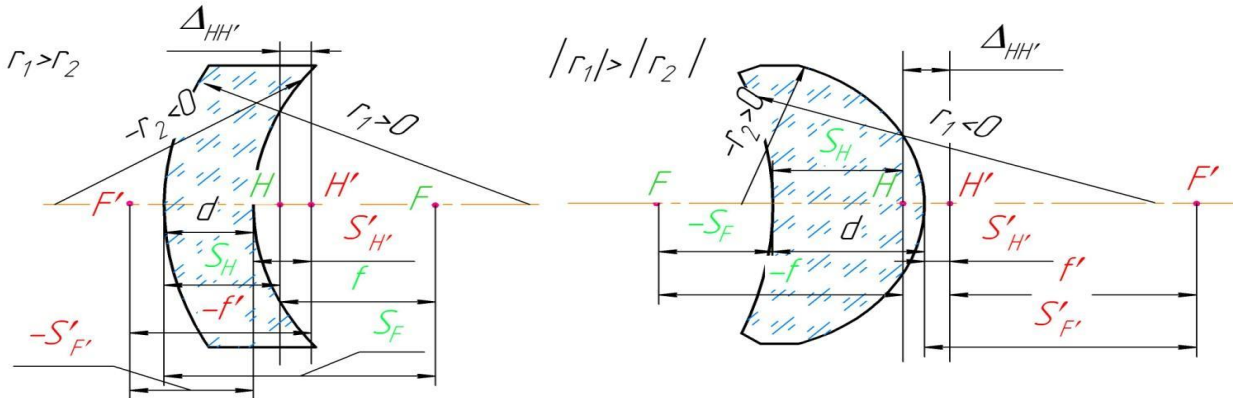


Рисунок 2.23 - Основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска до прикладу 6

Приклад 7. Визначення параксіальних параметрів випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска

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



Розрахункові формули	$r_1 = 20\text{мм}; r_2 = 10\text{ мм}$	$r_1 = -20\text{мм}; r_2 = -10\text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	-33,921	29,011
$f = -f'$	33,921	-29,011
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	2,646	2,263
$S_H = S_F - f$ перевірка	$36,567 - 33,921 = 2,646$	$-26,748 - (-29,011) = 2,263$
$S_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	1,323	1,132
$S_{H'} = S_{F'} - f'$ перевірка	$-32,598 - (-33,921) = 1,323$	$30,143 - 29,011 = 1,132$
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	36,567	-26,748
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-32,598	30,143
$\Delta_{HH'} = d + S_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0,677	0,867
y, мм	7	
n	1,6395	
Розташування предмету $k = 0.55$	$-a = k \cdot f =$ $0.55 \cdot (33.921) =$ $= 18,656\text{ мм}$	$-a = k \cdot f =$ $0.55 \cdot (-29.011) =$ $= -15,956\text{ мм}$

Приклад розрахунку в ППК MathCAD наведено в додатку Г

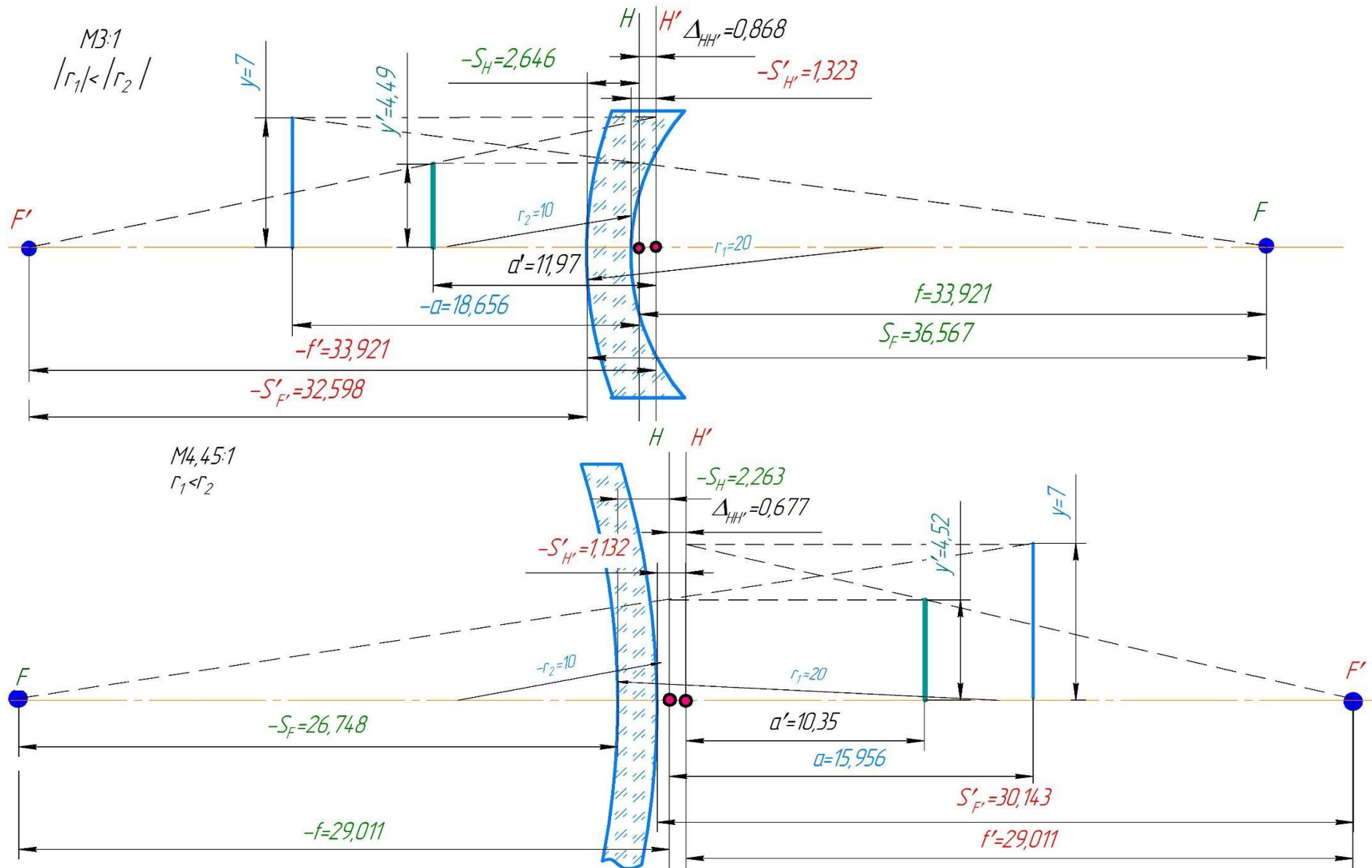


Рисунок 2.24 - Основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска

Додаток А – Зразок оформлення титульної сторінки

Міністерство освіти і науки України
Черкаський державний технологічний університет
«Кафедра приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій»

Контрольна робота
з дисципліни
«Оптико-електронні пристрої роботів»

Перевірив
викладач

П.І.П

Підпис викладача

Виконав
студент гр.ЗП-

П.І.П

Підпис студента

Черкаси 2025

Додаток Б - Бланк завдання на контрольну роботу
Завдання на контрольну роботу
з дисципліни «Оптико-електронні пристрої роботів»

Теоретичні питання

Тема «Основні відомості про компоненти оптоелектроніки»

Тема «Аналізатори зображення»

Тема «Модуляція і демодуляція сигналів в ОЕП»

Практичні завдання

1. Побудова зображення збиральною лінзою

Побудувати зображення лінзою додатною в залежності від відстані до предмету

2. Побудова зображення розсіювальною лінзою

Побудувати зображення лінзою від'ємною в залежності від відстані до предмету

3. 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 _____

4. Розрахувати основні параметри подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані

$$-a = k \cdot f', \text{ мм} \quad \text{та} \quad a = k \cdot f', \text{ мм} \quad \text{відповідно} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

5. Розрахувати основні параметри плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані

$$-a = k \cdot f', \text{ мм} \quad \text{та} \quad a = k \cdot f', \text{ мм} \quad \text{відповідно} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

6. Розрахувати основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані

$$-a = k \cdot f', \text{ мм} \quad \text{та} \quad a = k \cdot f', \text{ мм} \quad \text{відповідно} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

7. Розрахувати основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані

$$-a = k \cdot f', \text{ мм} \quad \text{та} \quad a = k \cdot f', \text{ мм} \quad \text{відповідно} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

Завдання отримав студент групи _____

Дата _____

Підпис _____

ДОДАТОК В - Варіанти вихідних даних до контрольної роботи

Теоретичні питання

Тема «Основні відомості про компоненти оптоелектроніки»

1. Основні параметри та характеристики світловипромінюючих діодів

Сила світла I_v . Яскравість L . Постійна пряма напруга $U_{пр}$. Максимально допустимий постійний прямий струм $I_{пр,max}$. Максимально допустима зворотна постійна напруга $U_{зв,max}$. Максимум спектрального розподілу L_{max} . Яскравісна характеристика. Світлова характеристика. Спектральна характеристика. Діаграма спрямованості.

2. Моді стійких резонаторів

Розкрити питання що є власними хвилями або власними типами коливань резонатора. Пояснити поняття ТЕМ – хвилею (Transversal Electromagnetic Mode – поперечна електромагнітна мода). Умовне позначення моди коливання. Навести приклади рисунків різ мод коливання

3. Вибір приймача випромінювання і його узгодження з оптичною системою і електронним трактом

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.

Навести типові схеми включення та узгоджуючі каскади приймачів випромінювання.

4. Параметри приймачів випромінювання

Чутливість. Струмова чутливістю S_I (А/лм). Інтегральна чутливістю. Монохроматична чутливість S_λ . Граничні та шумові параметри. Струм та напруга шуму. Границею чутливості приймача Φ_n в заданій смузі частот. Інерційність.

5. Характеристик приймачів випромінювання

Спектральні характеристики. Вольтові характеристики. Залежність параметрів від потужності випромінювання. Частотні характеристики. Фонові характеристики. Температурні характеристики. Часові і просторові характеристики

6. Паспортизація приймачів. Перерахунок їх параметрів

В реальних умовах роботи приймач випромінювання (ПВ) приймає потік, відмінний за свої спектральним складом від потоку, який він приймає при паспортизації. В деяких випадках ПВ, відкалібрований по відношенню до випромінювання із суцільним спектром, працює з монохроматичним потоком. Тому в кожному такому випадку параметри ПВ повинні бути перераховані для нових умов.

7. Фотоприймальні пристрої на фоторезисторах

Навести конструкцію фоторезистора. Пояснити принцип дії та основні розрахункові співвідношення. Навести основні характеристики та параметри фоторезисторів. Навести основні узгоджуючі каскади, що використовуються.

8. Фотоприймальні пристрої на фотодіодах

Принцип дії фотодіоду. Структура p-n – напівпровідника в стані рівноваги. Фотогоальванічний режим роботи. Фотодіодний режим роботи. Основні характеристики та параметри фотодіодів.

9. Фотоприймальні пристрої на фотодіодах

Схеми включення фотодіоду на активне навантаження в фотодіодному та фотогоальванічному режимі. Схеми включення на реактивне навантаження. Схеми ФПП для прийому синусоїдального модульованого сигналу та імпульсного сигналу з оптимальним фільтром. Функціональна схема ФПП з ланцюгом корекції у вигляді диференційного пристрою.

10. Фотоприймальні пристрої з приймачами випромінювання на основі зовнішнього фотоефекту

Конструкція та принцип дії вентильного фотоелементу. Схема ФПП із фотоелементом. Основні розрахункові співвідношення.

11. Фотоелектронний множник

Конструкція та принцип дії ФЕУ. Основні розрахункові співвідношення. Параметри промислових ФЕУ. Области застосування.

12. Фотоприймальні пристрої з тепловим випромінюванням.

Принципова схема ФПП з піроелектричним приймачем на основі істокового повторювача та ОП.

13. Вибір і розрахунок основних параметрів попередніх підсилювачів фотоприймальних пристроїв

Алгоритм розрахунку ФПП та вибір елементів.

14. Оптопари. Загальні відомості

Узагальнений принцип дії оптопари. Переваги та недоліки оптопар. Структурна схема оптопари. Умовне позначення.

15. Резисторна оптопара

Структурна схема та принцип дії резисторної оптопари. Основні параметри резисторних оптопар. Розповсюджені схеми застосування резисторних оптопар.

16. Діодна оптопара

Структурна схема та принцип дії діодної оптопари. Основні параметри діодних оптопар. Розповсюджені схеми застосування діодних оптопар.

17. Транзисторна оптопара

Структурна схема та принцип дії транзисторної оптопари. Основні параметри транзисторних оптопар. Розповсюджені схеми застосування транзисторних оптопар.

18. Тиристорна оптопара

Структурна схема та принцип дії тиристорної оптопари. Основні параметри тиристорних оптопар. Розповсюджені схеми застосування тиристорних оптопар.

19. Волоконна оптика та світлопроводи. Втрати в світлопроводі

Принцип розповсюдження світла по оптоволокну. Класифікація оптичних волокон. Переваги та недоліки оптоволокон. Основні втрати в світлопроводі.

20. Волоконно-оптичні датчики. Ендоскопи

Структурна схема датчиків із оптичним перетворенням, та зондом із оптичного волокна. Принципова схема лінзового ендоскопу. Типова схема гнучкого ендоскопу. Конструкції декількох ендоскопів технічних гнучких керованих.

Тема «Аналізатори зображення»

21. Основні параметри і характеристики аналізаторів. Світлоподільні амплітудні аналізатори

Аналізатор зображення – це пристрій, що слугує для виділення із оптичного сигналу у вигляді зображення спостережного об'єкту інформації про параметри або властивості цього об'єкту (або поля). Основною характеристикою аналізатора є його характеристика перетворення, або статична характеристика, яка представляє собою залежність зміни інформативного параметру вихідного сигналу від зміни відслідкованого параметру зображення.

Схема ОЕП із аналізатором – світлоподільним блоком.

22. Амплітудно-фазові аналізатори

Аналізатор зображення – це пристрій, що слугує для виділення із оптичного сигналу у вигляді зображення спостережного об'єкту інформації про параметри або властивості цього об'єкту (або поля).

Достатньо розповсюджені на практиці амплітудно-фазові аналізатори, які в результаті сканування зображення створюють сигнал із амплітудою і фазою, що змінюється в залежності від параметрів зображення, частіше за все від координат зображення в площині аналізу.

Схема ОЕП із амплітудно-фазовим аналізатором – напівдиском.

23. Фазові і частотні аналізатори

Принцип дії найпростішого фазового растрового аналізатора.

Аналізатори, в яких інформативним параметром вихідного сигналу є частота, зазвичай використовують для визначення координат малорозмірних випромінювачів, розташованих в кутовому полі ОЕП.

24. Часоімпульсні (фазоімпульсні) аналізатори

Принцип дії цих аналізаторів заснований на зміні часового інтервалу між двома імпульсами або фази імпульсів, створених сигналом при скануванні поля зображення, і відліковується відносно деякого опорного зображення. Схеми аналізаторів із рухомих растром та схема із рухомими зображенням.

25. Аналізатори на базі аналогових напівпровідникових первинних перетворювачів

Ряд розроблених напівпровідникових перетворювачів оптичних сигналів із успіхом використовують в якості аналізаторів зображення. До них відносять координатні або позиційно-чутливі фотоприймачі, розгортуючі фотоприймачі та селективно-перетворювальні фотоприймачі.

26. Багатоелементні приймачі випромінювання як аналізатор зображення

Широке розповсюдження в якості аналізаторів зображення отримали приймачі випромінювання із дискретною структурою фотоприемника і перш за все напівпровідникові приймачі у вигляді мозаїк або матриць.

Тема «Модуляція і демодуляція сигналів в ОЕП»

27. Загальна характеристика способів модуляції сигналу в ОЕП

28. Витрати потужності при модуляції

29. Модуляція оптичних сигналів за допомогою растрів

30. Електрооптичні та інші типи модуляторів

31. Просторово-часові модулятори

32. Демодуляція сигналів

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
дано	$a, \text{мм}$	-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
дано	$a, \text{мм}$	-70	-80	-60	-25	+25	-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
дано	$a, \text{мм}$	-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
дано	$a, \text{мм}$	-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
дано	$a, \text{мм}$	-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				

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
дано	$a, \text{мм}$	-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
дано	$a, \text{ мм}$	-82	-72	-62	-52	+20	-88	-78	-68	-58	+21	-92	-82	-72	-62	+22
	$f', \text{ мм}$	-36					-39					-41				
	$y, \text{ мм}$	28.0					28.5					29.0				

варіант		7					8					9				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
дано	$a, \text{ мм}$	-22	-12	-10	-4	+4	-26	-16	-12	-5	+5	-30	-18	-15	-7	+7
	$f', \text{ мм}$	-6					-8					-9				
	$y, \text{ мм}$	18					21					23				

варіант		10					11					12				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
дано	$a, \text{ мм}$	-	-	-	-8	+8	-	-	-	-	+10	-	-	-	-	+10
	$f', \text{ мм}$	35	24	17	-8	+8	35	32	20	10	+10	40	36	25	15	+10
	$y, \text{ мм}$	-12					-16					-18				
		23.5					24.0					24.5				

варіант		13					14					15				
предмет		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
дано	$a, \text{ мм}$	-	-	-	-18	+5	-	-	-	-20	+10	-	-	-44	-	+15
	$f', \text{ мм}$	52	42	30	-18	+5	56	46	35	-20	+10	64	54	-44	30	+15
	$y, \text{ мм}$	-21					-23					-27				
		25					25.5					26.0				

Завдання 3. Визначення параксіальних параметрів випукло-плоскої та ввігнуто-плоскої лінзи

Розрахувати основні параметри випукло-плоскої та ввігнуто-плоскої 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	
$r_1, \text{ мм}$		31	-31	32	-32	35	-35	37	-37	40	-40
Розташування предмету		$k = 2.15$		2.1		2.15		2.05		2.25	
$y, \text{ мм}$		13		12		15		17		20	
n		1.8114		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 розрахунку.

2* Виконати побудову зображення для предмету, що розташований на заданій відстані (див. приклад 1)

Завдання 4. Визначення параксіальних параметрів подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи

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	
$r_1, \text{мм}$	43	-43	44	-44	46	-46	48	-48	50	-50
$r_2, \text{мм}$	-43	43	-44	44	-46	46	-48	48	-50	50
Розташування предмету	$k=2$									
$y, \text{мм}$	13		14		16		18		21	
n	1.8114		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		1.5175		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 розрахунку.
 2* Виконати побудову зображення для предмету, що розташований на заданій відстані (див. приклад 1)

Вихідні дані										
варіант	6		7		8		9		10	
$r_2, \text{мм}$	-20	20	-22	22	-24	20	-20	22	-22	24
Розташування предмету	$k = 1.35$		1.45		1.55		1.65		1.75	
$y, \text{мм}$	17		19		21		23		25	
n	1.5795		1.5826		1.6222		1.6259		1.6334	

Вихідні дані										
варіант	11		12		13		14		15	
$r_2, \text{мм}$	-30	30	-32	32	-34	34	-36	36	-38	38
Розташування предмету	$k = 1.15$		1.25		1.35		1.45		1.55	
$y, \text{мм}$	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. приклад 1)

Завдання 5 Визначення параксіальних параметрів плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи

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

Завдання 6. Визначення параксіальних параметрів випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска

Розрахувати основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані

Вихідні дані										
варіант	1		2		3		4		5	
$r_2, \text{мм}$	-11	11	-12	12	-14	10	-10	12	-12	14
Розташування предмету	$k = 1.25$		1.35		1.45		1.35		1.55	
$y, \text{мм}$	8		9		11		13		15	
n	1.6334		1.5826		1.6222		1.6259		1.6334	
Вихідні дані										
варіант	6		7		8		9		10	
$r_2, \text{мм}$	-20	20	-22	22	-24	20	-20	22	-22	24
Розташування предмету	$k = 1.35$		1.45		1.55		1.65		1.75	
$y, \text{мм}$	17		19		21		23		25	
n	1.5795		1.5826		1.6222		1.6259		1.6334	

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

Вихідні дані											
варіант	1		2		3		4		5		
$r_1, \text{мм}$	12	-12	11	-11	12	-12	13	-13	14	-14	
$r_2, \text{мм}$	25	-25	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24	
Розташування предмету	$k = 0.55$		0.65		0.65		0.55		0.45		
$y, \text{мм}$	8		9		11		13		15		
n	1.7521		1.6709		1.6140		1.7424		1.7521		
Вихідні дані											

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		

*Примітка.

1* На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку.

2* Виконати побудову зображення для предмету, що розташований на заданій відстані (див. приклад 1)

Завдання 7. Визначення параксіальних параметрів випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска

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_2 , мм	12	-12	11	-11	12	-12	13	-13	14	-14
r_1 , мм	25	-25	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24
Розташування предмету	$k = 0.55$		0.65		0.65		0.55		0.45	
y , мм	8		9		11		13		15	
n	1.7521		1.6709		1.6140		1.7424		1.7521	

Вихідні дані										
варіант	6		7		8		9		10	
r_2 , мм	20	-20	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24
r_1 , 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 , мм	18		19		20		21		22	
n	1.6395		1.6709		1.6140		1.7424		1.7521	

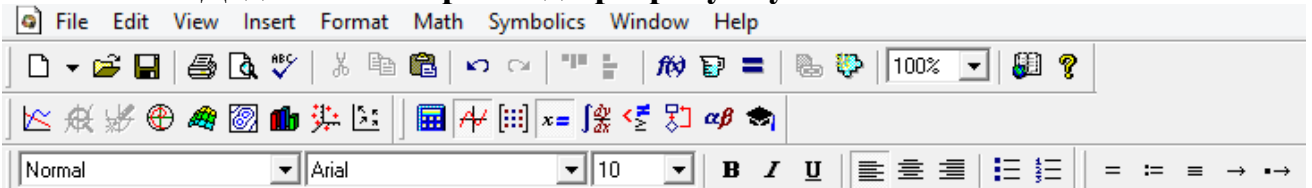
Вихідні дані										
варіант	11		12		13		14		15	
r_2 , мм	15	-15	16	-16	17	-17	18	-18	19	-19
r_1 , мм	25	-25	26	-26	27	27	28	-28	29	-29
Розташування предмету	$k = 0.55$		0.65		0.65		0.55		0.45	
y , мм	13		14		16		16		17	
n	1.6395		1.6709		1.6140		1.7424		1.7521	

*Примітка.

1* На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку.

2* Виконати побудову зображення для предмету, що розташований на заданій відстані (див. приклад 1)

Додаток Г – Приклади розрахунку в ППК MathCAD



Приклад 1. Побудова зображення збиральною лінзою в залежності від відстані до предмету

Дано:

- задня фокусна відстань
- розмір предмету
- апертурний кут в області предмету

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

$$y := 26$$

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

- розташування предмету на відстані a

$$i := 1..5$$

$$i =$$

1
2
3
4
5

$$a_i :=$$

-86
-95
-65
-25
44

1. Визначаємо відстань z за формулою

$$z = a - f$$

$$z_i := a_i - f$$

$$z_i =$$

-43
-52
-22
18
87

2. Визначаємо кутове збільшення оптичної системи за формулою

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

$$\gamma_i := \frac{z_i}{ff}$$

$$\gamma_i =$$

-1
-1.209
-0.512
0.419
2.023

3. Визначаємо відстань a' із формули

$$\gamma = \frac{a}{a'}$$

$$aa_i := \frac{a_i}{\gamma_i}$$

$$aa_i =$$

86
78.558
127.045
-59.722
21.747

4. Визначаємо лінійне збільшення ОС за формулою

$$\beta = \frac{-f}{f'} \cdot \frac{d'}{a}$$

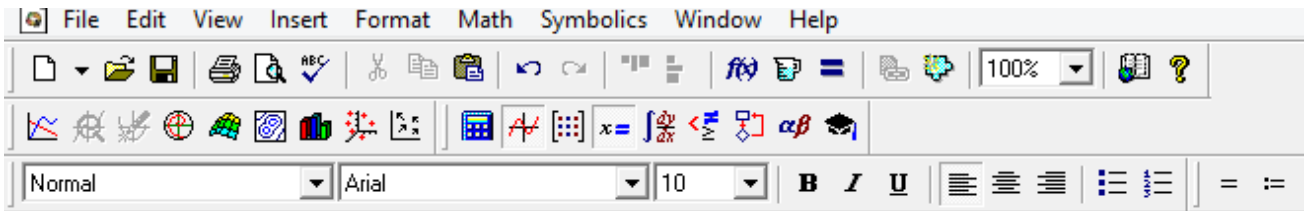
$$\beta_i := \frac{-f \cdot aa_i}{ff \cdot a_i}$$

$$\beta_i =$$

-1
-0.827
-1.955
2.389
0.494

5. Визначаємо апертурний кут в області

+



4. Визначаємо лінійне збільшення ОС за формулою

$$\beta = \frac{-f}{f'} \cdot \frac{d'}{a}$$

$$\beta_i := \frac{-f \cdot aa_i}{ff \cdot a_i}$$

$\beta_i =$

-1
-0.827
-1.955
2.389
0.494

5. Визначаємо апертурний кут в області зображення за формулою

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

$$\sigma\sigma_i := \text{atan}(\gamma_i \cdot \tan(\sigma)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$\sigma\sigma_i =$

20
23.757
10.549
-8.663
-36.368

6. Визначаємо відстань z' за формулою

$$z' = a' - f'$$

$$zz_i := aa_i - ff$$

$zz_i =$

43
35.558
84.045
-102.722
-21.253

7. Визначаємо розмір зображення y' за формулою

$$y' = \beta \cdot y$$

$$yy_i := \beta_i \cdot y$$

$yy_i =$

-26
-21.5
-50.818
62.111
12.851

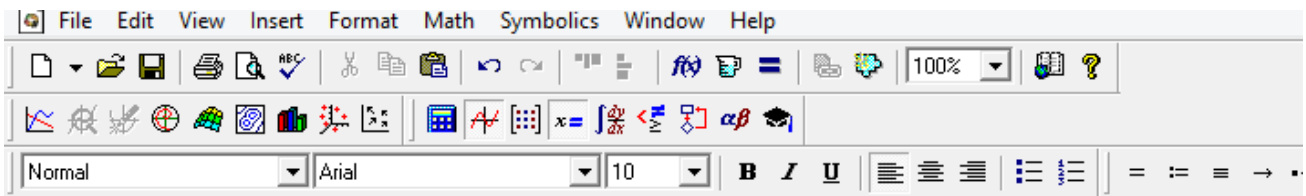
8. Виконуємо перевірку правильності розрахунків

$$\gamma \cdot \beta = 1$$

$$\gamma_i \cdot \beta_i =$$

1
1
1
1
1

+



Приклад 2. Побудова зображення від'ємною лінзою в залежності від відстані до предмету

Дано:

- задня фокусна відстань
- розмір предмету
- апертурний кут в області предмету
- розташування предмету на відстані a

$$ff := -73 \quad f := -ff$$

$$y := 46$$

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

$i := 1..5$

$i =$	$a_i :=$
1	-156
2	-146
3	-136
4	-53
5	43.6

1. Визначаємо відстань z за формулою

$$z = a - f \quad z_i := a_i - f$$

$z_i =$

-229
-219
-209
-126
-29.4

2. Визначаємо кутове збільшення оптичної системи за формулою

$$\gamma = \frac{z}{f'} \quad \gamma_i := \frac{z_i}{ff} \quad \gamma_i =$$

3.137
3
2.863
1.726
0.403

3. Визначаємо відстань a' із формули

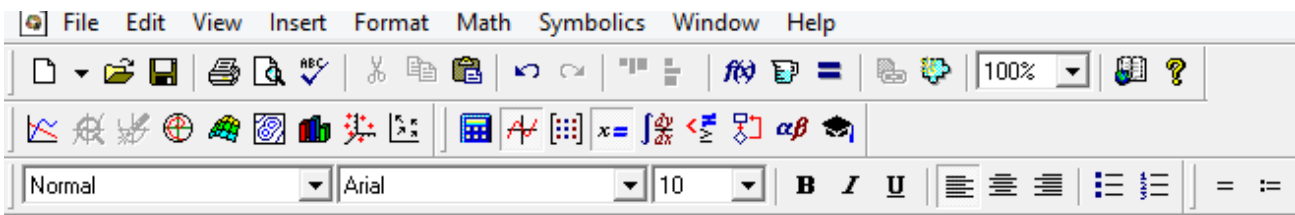
$$\gamma = \frac{a}{a'} \quad aa_i := \frac{a_i}{\gamma_i} \quad aa_i =$$

-49.729
-48.667
-47.502
-30.706
108.259

4. Визначаємо лінійне збільшення ОС за формулою

$$\beta = \frac{-f}{f'} \cdot \frac{d}{a} \quad \beta_i := \frac{-1 \cdot aa_i}{ff \cdot a_i} \quad \beta_i =$$

0.319
0.333
0.349
0.579



4. Визначаємо лінійне збільшення ОС за формулою

$$\beta = \frac{-f}{f'} \cdot \frac{d}{a}$$

$$\beta_i := \frac{-f \cdot aa_i}{ff \cdot a_i}$$

$\beta_i =$

0.319
0.333
0.349
0.579
2.483

5. Визначаємо апертурний кут в області зображення за формулою

$$\sigma' = \arctg(\gamma \cdot \text{tg}(\sigma))$$

$$\sigma\sigma_i := \text{atan}(\gamma_i \cdot \tan(\sigma)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$\sigma\sigma_i =$

-48.787
-47.516
-46.18
-32.138
-8.339

6. Визначаємо відстань z' за формулою

$$z' = a' - f'$$

$$zz_i := aa_i - ff$$

$zz_i =$

23.271
24.333
25.498
42.294
181.259

7. Визначаємо розмір зображення y' за формулою

$$y' = \beta \cdot y$$

$$yy_i := \beta_i \cdot y$$

$yy_i =$

14.664
15.333
16.067
26.651
114.218

8. Виконуємо перевірку правильності розрахунків

$$\gamma \cdot \beta = 1$$

$\gamma_i \cdot \beta_i =$

1
1
1
1
1

Приклад 3. Визначення параксiальних параметрiв випукло-плоско лiнзи

Вихiднi данi до розрахунку

товщина лiнзи	$d := 2$		
показник заломлення лiнзи	$n := 1.7512$		
радиуси кривизни лiнзи	$r1 := 30$ $r2 := 1000000$		
Задня фокусна вiдстань лiнзи	$f' = \frac{r_1}{(n-1)}$	$ff := \frac{r1}{n-1}$	$ff = 39.936$
Передня фокусна вiдстань лiнзи	$f = -f'$	$f := -ff$	$f = -39.936$
Переднiй фокальний вiдрiзок		$Sf := -ff$	$Sf = -39.936$
Заднiй фокальний вiдрiзок	$S'_F = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	$Sff := \frac{r1}{(n-1)} \cdot \left[1 - \frac{d}{r1} \cdot \frac{(n-1)}{n} \right]$	$Sff = 38.794$
Вiдстань вiд передньої головної площини до вершини передньої поверхнi		$Sh := 0$	
Вiдстань вiд задньої головної площини до вершини задньої поверхнi	$S'_H = -\frac{d}{n}$	$Shh := -\frac{d}{n}$	$Shh = -1.142$
Вiдстань мiж головними площинами	$\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$	$\Delta := \frac{d \cdot (n-1)}{n}$	$\Delta = 0.858$
Перевiрка	$S_H = S_F - f$	$Sh := Sf - ((-ff))$	$Sh = 0$
	$S'_H = S'_F - f'$	$Shh := Sff - ff$	$Shh = -1.142$

Утворення зображення в оптичнiй системi

Дано:

- розмiр предмету	$y := 10$		
-апертурний кут променя		$\sigma := -30 \cdot \frac{\pi}{180}$	
вiдстань вiд предмету до оптичного компоненту	$k := 2.15$		
	$-a = k \cdot f$	$a := -k \cdot f$	$a = 85.863$

Вiдстань вiд фокусу до предмету	$z := a - f$	$z = 125.799$	
Кутове збiльшення ОС	$\gamma := \frac{z}{ff}$	$\gamma = 3.15$	
Вiдстань до зображення	$aa := \frac{a}{-\gamma}$	$aa = 27.258$	
Вiдстань вiд фокусу до зображення	$zz := aa - ff$	$zz = -12.678$	
Апертурний кут в областi зображення	$\sigma\sigma := \text{atan}(\gamma \cdot \tan(\sigma)) \cdot \frac{180}{\pi}$		$\sigma\sigma = -61.195$
Лiнiйне збiльшення ОС	$\beta := \frac{-f \cdot aa}{ff \cdot a}$	$\beta = 0.317$	
Розмiр зображення	$yy := \beta \cdot y$	$yy = 3.175$	

Приклад 3. Розрахунок кардинальних точок оптичної системи матричним методом

Вихідні дані до розрахунку

товщина лінзи

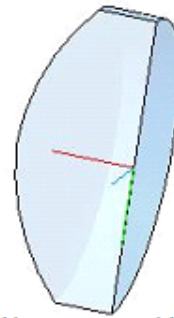
$$d := 2$$

показник заломлення лінзи

$$n := 1.7512$$

радіуси кривизни лінзи

$$r1 := 30 \quad r2 := 1000000$$



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

$$\begin{aligned} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n}{r2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{r1} & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -P1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - P1 \cdot L & L \\ -(P1 + P2 - P1 \cdot P2 \cdot L) & 1 - P2 \cdot L \end{pmatrix} \end{aligned}$$

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

$$\begin{pmatrix} A_{linz} & B_{linz} \\ C_{linz} & D_{linz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.971 & 1.142 \\ -0.025 & 1 \end{pmatrix}$$

Передня фокусна відстань лінзи

$$f := \frac{1}{C_{linz}} \quad f = -39.93727$$

Задня фокусна відстань лінзи

$$ff := \frac{-1}{C_{linz}} \quad ff = 39.937$$

Передній фокальний відрізок

$$S_F \quad SF := \frac{D_{linz}}{C_{linz}} \quad SF = -39.937$$

Задній фокальний відрізок

$$S'_F \quad SFF := \frac{-A_{linz}}{C_{linz}} \quad SFF = 38.795$$

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні

$$S_H \quad SH := \frac{D_{linz} - 1}{C_{linz}} \quad SH = -3.426 \times 10^{-5}$$

Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні

$$S'_H \quad SHH := \frac{1 - A_{linz}}{C_{linz}} \quad SHH = -1.142$$

Відстань між головними площинами

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

$$\Delta_{HH'} := \frac{(d \cdot C_{linz} + 2 - A_{linz} - D_{linz})}{C_{linz}} \quad \Delta_{HH'} = 0.858$$

Утворення зображення в оптичній системі

Дано:

- розмір предмету

-апертурний кут променя

відстань від предмету до оптичного компоненту

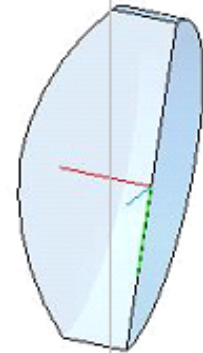
$$y := 10$$

$$\sigma := -30$$

$$k := 2.15$$

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

$$a = 85.865$$



Задаємо

- кутова координата

$$-a = k \cdot f' \text{ мм}$$

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

$$v = -52.536$$

Записуємо матрицю утворення зображення в оптичній системі

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

*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

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

$$aa = 27.259$$

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

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.31746 & 3.552714 \times 10^{-15} \\ -0.025039 & 3.15 \end{pmatrix}$$

Зідстань від фокусу до предмету

$$z := D \cdot ff$$

$$z = 125.802$$

Зідстань від фокусу до зображення

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

$$zz = -12.6785$$

Розмір зображення і апертурний кут в області зображення

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ v/n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1746 \\ -94.75039 \end{pmatrix}$$

Приклад 4. Визначення параксiальних параметрiв подвiйно-вiгнутої лiнзи

Вихiднi данi до розрахунку

товщина лiнзи $d := 2$
 показник заломлення лiнзи $n := 1.7512$
 радiуси кривизни лiнзи $r1 := -42$ $r2 := 42$ $i := 1..5$

Задня фокусна вiдстань лiнзи $f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$ $ff := \frac{n \cdot r1 \cdot r2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r2 - r1) + (n-1) \cdot d]}$ $ff = -27.673$

Передня фокусна вiдстань лiнзи $f = -f'$ $f := -ff$ $f = 27.673$

Переднiй фокальний вiдрiзок $S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n}\right]$ $Sf := -\left[ff \cdot \left[1 + \frac{d}{r2} \cdot \frac{(n-1)}{n}\right]\right]$ $Sf = 28.238$

Заднiй фокальний вiдрiзок $S'_F = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n}\right]$ $Sff := ff \cdot \left[1 - \frac{d}{r1} \cdot \frac{(n-1)}{n}\right]$ $Sff = -28.238$

Вiдстань вiд передньої головної площини до вершини передньої поверхнi $S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$ $Sh := -ff \cdot d \cdot \left(\frac{n-1}{n \cdot r2}\right)$ $Sh = 0.565$

Вiдстань вiд задньої головної площини до вершини задньої поверхнi $S'_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$ $Shh := (-ff) \cdot d \cdot \left(\frac{n-1}{n \cdot r1}\right)$ $Shh = -0.565$

Вiдстань мiж головними площинами $\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H$ $\Delta := d + Shh - Sh$ $\Delta = 0.869$

Перевiрка $S_H = S_F - f$ $Sh := Sf - ((-ff))$ $Sh = 0.565$
 $S'_H = S'_F - f'$ $Shh := Sff - ff$ $Shh = -0.565$

Утворення зображення в оптичнiй системi

Дано:

- розмiр предмету $y := 12$
 - апертурний кут променя $\sigma := -30 \cdot \frac{\pi}{180}$
 вiдстань вiд предмету до оптичного компоненту $k := 2$
 $-a = k \cdot f$ $a := -k \cdot f$ $a = -55.345$

Вiдстань вiд фокусу до предмету $z := a - f$ $z = -83.018$

Кутове збiльшення ОС $\gamma := \frac{z}{ff}$ $\gamma = 3$

Вiдстань до зображення $aa := \frac{a}{\gamma}$ $aa = -18.448$

Вiдстань вiд фокусу до зображення $zz := aa - ff$ $zz = 9.224$

Апертурний кут в областi зображення $\sigma\sigma := \text{atan}(\gamma \cdot \tan(\sigma)) \cdot \frac{180}{\pi}$ $\sigma\sigma = -60$

Лiнiйне збiльшення ОС $\beta := \frac{-1 \cdot aa}{ff \cdot a}$ $\beta = 0.333$

Розмiр зображення $yy := \beta \cdot y$ $yy = 4$

Приклад 5. Визначення параксіальних параметрів плоско-ввігнутої лінзи

Вихідні дані до розрахунку

товщина лінзи	$d := 2$		
показник заломлення лінзи	$n := 1.5795$		
радіуси кривизни лінзи	$r1 := 10000000$	$r2 := 10$	
Задня фокусна відстань лінзи	$f' = \frac{-r_2}{(n-1)}$	$ff := \frac{-r2}{n-1}$	$ff = -17.256$
Передня фокусна відстань лінзи	$f = -f'$	$f := -ff$	$f = 17.256$
Передній фокальний відрізок	$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	$Sf := -ff \cdot \left[1 + \frac{d}{r2} \cdot \frac{(n-1)}{n} \right]$	$Sf = 18.522$
Задній фокальний відрізок		$Sff := ff$	$Sff = -17.256$
Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні	$S_H = \frac{d}{n}$	$Sh := \frac{d}{n}$	$Sh = 1.266$
Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні		$Shh := 0$	$Shh = 0$
Відстань між головними площинами	$\Delta_{HH'} = d + S_{H'} - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$	$\Delta := \frac{d \cdot (n-1)}{n}$	$\Delta = 0.734$
Перевірка	$S_H = S_F - f$	$Sh := Sf - ((f))$	$Sh = 1.266$
	$S_{H'} = S_{F'} - f'$	$Shh := Sff - ff$	$Shh = 0$

Утворення зображення в оптичній системі

Дано:

- розмір предмету	$y := 7$	
- апертурний кут променя		$\sigma := -30 \cdot \frac{\pi}{180}$
відстань від предмету до оптичного компоненту	$k := 1.25$	
	$-a = k \cdot f$	$a := -k \cdot f \quad a = -21.57$

Відстань від фокусу до предмету $z := a - f \quad z = -38.827$

Кутове збільшення ОС $\gamma := \frac{z}{ff} \quad \gamma = 2.25$

Відстань до зображення $aa := \frac{a}{\gamma} \quad aa = -9.587$

Відстань від фокусу до зображення $zz := aa - ff \quad zz = 7.669$

Апертурний кут в області зображення $\sigma\sigma := \text{atan}(\gamma \cdot \tan(\sigma)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \sigma\sigma = -52.411$

Лінійне збільшення ОС $\beta := \frac{-1 \cdot aa}{ff \cdot a} \quad \beta = 0.444$

Розмір зображення $yy := \beta \cdot y \quad yy = 3.111$

Приклад 6. Визначення параксiальних параметрiв ввiгнуто-випуклого менiска

Вихiднi данi до розрахунку

товщина лiнзи $d := 2$
 показник заломлення лiнзи $n := 1.6395$
 радiуси кривизни лiнзи $r1 := 10$ $r2 := 20$

Задня фокусна вiдстань лiнзи	$f' = n \cdot \frac{\eta \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	$ff := \frac{n \cdot r1 \cdot r2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r2 - r1) + (n-1) \cdot d]}$	$ff = 29.011$
Передня фокусна вiдстань лiнзи	$f = -f'$	$f := -ff$	$f = -29.011$
Переднiй фокальний вiдрiзок	$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	$Sf := \left[ff \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{(n-1)}{n} \right] \right]$	$Sf = -30.143$
Заднiй фокальний вiдрiзок	$S'_F = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	$Sff := ff \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{(n-1)}{n} \right]$	$Sff = 26.748$
Вiдстань вiд передньої головної площини до вершини передньої поверхнi	$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	$Sh := -ff \cdot d \cdot \left(\frac{n-1}{n \cdot r_2} \right)$	$Sh = -1.132$
Вiдстань вiд задньої головної площини до вершини задньої поверхнi	$S'_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	$Shh := (-ff) \cdot d \cdot \left(\frac{n-1}{n \cdot r_1} \right)$	$Shh = -2.263$
Вiдстань мiж головними площинами	$\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H$	$\Delta := d + Shh - Sh$	$\Delta = 0.868$
Перевiрка	$S_H = S_F - f$ $S'_H = S'_F - f'$	$Sh := Sf - ((-ff))$ $Shh := Sff - ff$	$Sh = -1.132$ $Shh = -2.263$

Утворення зображення в оптичнiй системi

Дано:

- розмiр предмету $y := 7$
 - апертурний кут променя $\sigma := -30 \cdot \frac{\pi}{180}$
 вiдстань вiд предмету до оптичного компоненту $k := 0.55$
 $-a = k \cdot f$ $a := -k \cdot f$ $a = 15.956$

Вiдстань вiд фокусу до предмету	$z := a - f$	$z = 44.967$
Кутове збiльшення ОС	$\gamma := \frac{z}{ff}$	$\gamma = 1.55$
Вiдстань до зображення	$aa := \frac{a}{\gamma}$	$aa = 10.294$
Вiдстань вiд фокусу до зображення	$zz := aa - ff$	$zz = -18.717$
Апертурний кут в областi зображення	$\sigma\sigma := \text{atan}(\gamma \cdot \tan(\sigma)) \cdot \frac{180}{\pi}$	$\sigma\sigma = -41.825$
Лiнiйне збiльшення ОС	$\beta := \frac{-1 \cdot aa}{ff \cdot a}$	$\beta = 0.645$
Розмiр зображення	$yy := \beta \cdot y$	$yy = 4.516$

Приклад 7. Визначення параксіальних параметрів випукло-ввігнутого меніска

Вихідні дані до розрахунку

товщина лінзи $d := 2$
 показник заломлення лінзи $n := 1.6395$
 радіуси кривизни лінзи $r1 := -20$ $r2 := -10$

Задня фокусна відстань лінзи $f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$ $ff := \frac{n \cdot r1 \cdot r2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r2 - r1) + (n-1) \cdot d]}$ $ff = 29.011$

Передня фокусна відстань лінзи $f = -f'$ $f := -ff$ $f = -29.011$

Передній фокальний відрізок $S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n}\right]$ $Sf := \left[ff \cdot \left[1 + \frac{d}{r2} \cdot \frac{(n-1)}{n}\right]\right]$ $Sf = -26.748$

Задній фокальний відрізок $S'_F = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n}\right]$ $Sff := ff \cdot \left[1 - \frac{d}{r1} \cdot \frac{(n-1)}{n}\right]$ $Sff = 30.143$

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні $S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$ $Sh := -ff \cdot d \cdot \left(\frac{n-1}{n \cdot r2}\right)$ $Sh = 2.263$

Відстань від задньої головної площини до вершини задньої поверхні $S'_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$ $Shh := (-ff) \cdot d \cdot \left(\frac{n-1}{n \cdot r1}\right)$ $Shh = 1.132$

Відстань між головними площинами $\Delta_{HH'} = d + S'_H - S_H$ $\Delta := d + Shh - Sh$ $\Delta = 0.868$

Перевірка $S_H = S_F - f$ $Sh := Sf - ((-ff))$ $Sh = 2.263$
 $S'_H = S'_F - f'$ $Shh := Sff - ff$ $Shh = 1.132$

Утворення зображення в оптичній системі

Дано:

- розмір предмету $y := 7$
 - апертурний кут променя $\sigma := -30 \cdot \frac{\pi}{180}$ $f = -29.011$
 відстань від предмету до оптичного компоненту $k := 0.55$

$-a = k \cdot f$ $a := -k \cdot f$ $a = 15.956$

Відстань від фокусу до предмету $z := a - f$ $z = 44.967$

Кутове збільшення ОС $\gamma := \frac{z}{ff}$ $\gamma = 1.55$

Відстань до зображення $aa := \frac{a}{\gamma}$ $aa = 10.294$

Відстань від фокусу до зображення $zz := aa - ff$ $zz = -18.717$

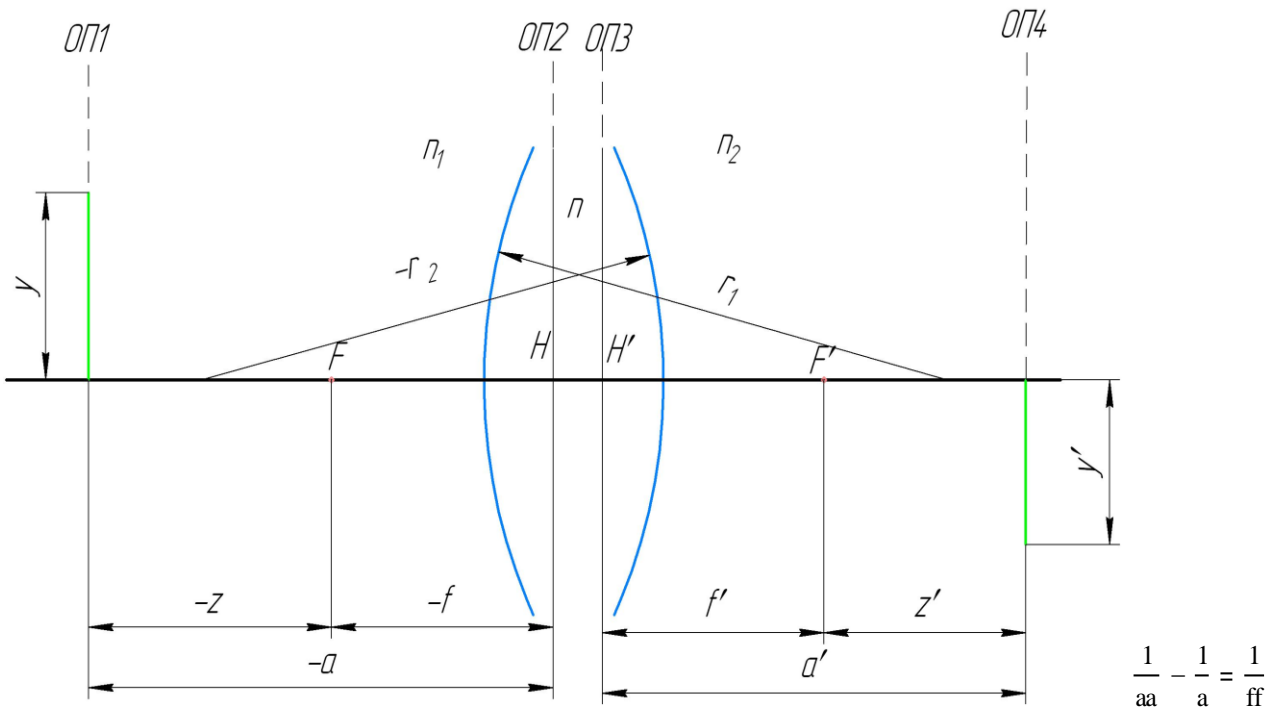
Апертурний кут в області зображення $\sigma\sigma := \text{atan}(\gamma \cdot \tan(\sigma)) \cdot \frac{180}{\pi}$ $\sigma\sigma = -41.825$

Лінійне збільшення ОС $\beta := \frac{-1 \cdot aa}{ff \cdot a}$ $\beta = 0.645$

Розмір зображення $yy := \beta \cdot y$ $yy = 4.516$

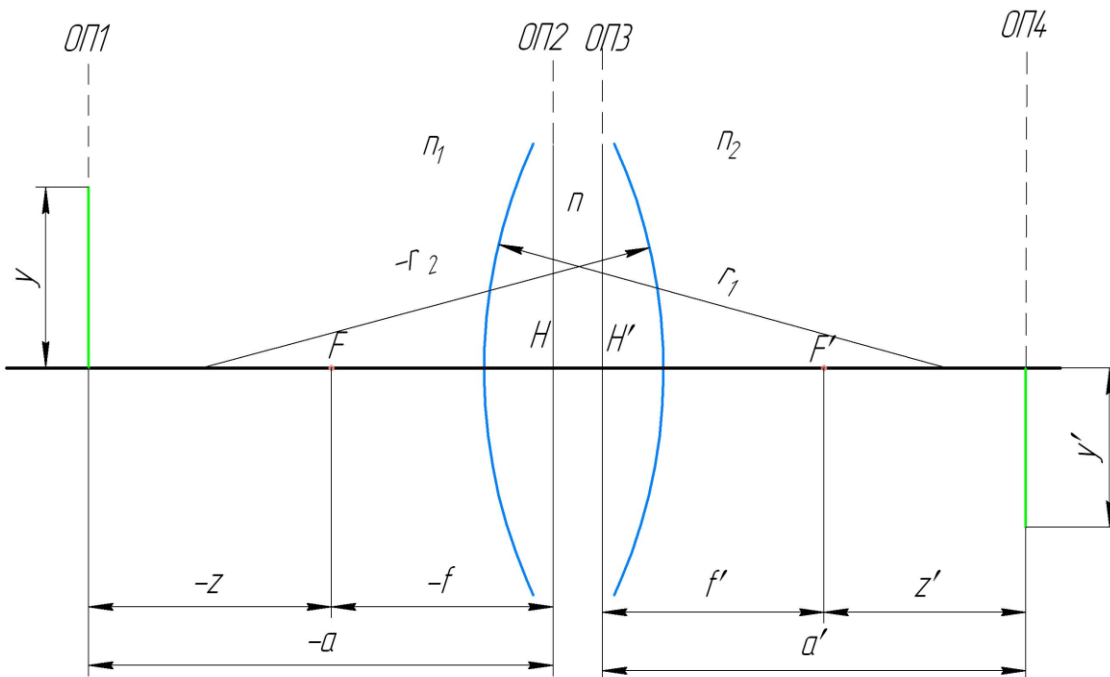
Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

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 променю параксіального променю 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?
6. Класифікація лінз.
7. Основні параметри оптичної системи з плоско-ввігнутою лінзою.
8. Основні параметри оптичної системи з плоско-випуклою лінзою.
9. Основні параметри оптичної системи з подвійно-ввігнутою лінзою.
10. Основні параметри оптичної системи додатним меніском.
11. Основні параметри оптичної системи від'ємним меніском.
12. Оптична сила системи.
13. Визначити лінійне та кутове збільшення оптичної системи, оптичну силу системи матричним методом. Визначити зображення та апертурний кут в області зображення. Дано $y = 20 \text{ мм}$, $n = 1.5718$, $-\sigma = 30^\circ$, $-a = 30 \text{ мм}$, $a' = 55 \text{ мм}$



$$\frac{1}{aa} - \frac{1}{a} = \frac{1}{ff}$$

14. Визначити лінійне та кутове збільшення оптичної системи, оптичну силу системи матричним методом. Дано $y = 25 \text{ мм}$, $n = 1.62$, $f' = 45 \text{ мм}$, $-a = 75 \text{ мм}$, $\sigma = 25^\circ$



$$M = \mathfrak{S} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix}, \text{ який}$$

15. Матриця оптичної системи має вигляд
рисунок відповідає цій матриці.

$$M = \mathfrak{R}_2 \cdot \mathfrak{S} \cdot \mathfrak{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix}, \text{ який}$$

16. Матриця оптичної системи має вигляд
рисунок відповідає цій матриці.

17. Матриця оптичної системи має вигляд

$$M = \mathfrak{S}_2 \cdot M_{\text{лінзи}} \cdot \mathfrak{S}_1 = \begin{pmatrix} 1 & z' + S'_{F'} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot (M_{\text{лінзи}}) \cdot \begin{pmatrix} 1 & -(z + S_F) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
 який рисунок відповідає цій матриці.

18. Матриця оптичної системи має вигляд

$$M = \mathfrak{R}_2 \cdot \mathfrak{S} \cdot \mathfrak{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 - P_1 \cdot L & L \\ -(P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 \cdot L) & 1 - P_2 \cdot L \end{pmatrix}$$

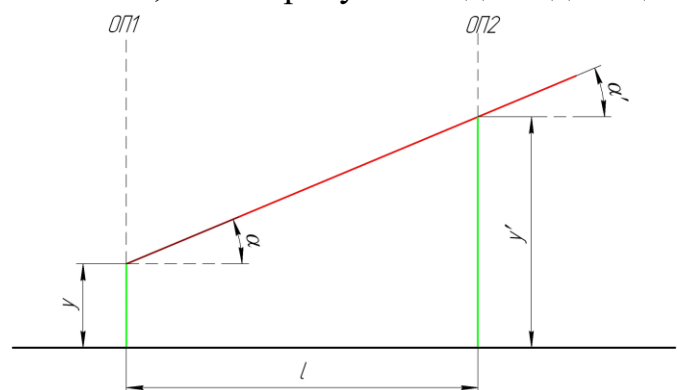
$$P_2 = \frac{1-n}{r_2}; P_1 = \frac{n-1}{r_1}$$

матриці

19. Дано оптична система .

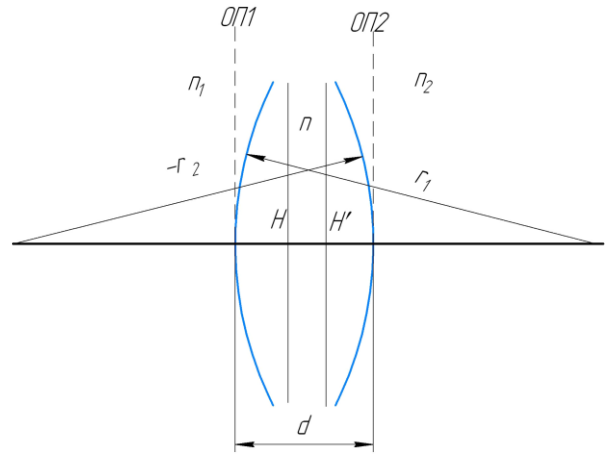
Яка матриця описує цю оптичну систему

, який рисунок відповідає цій

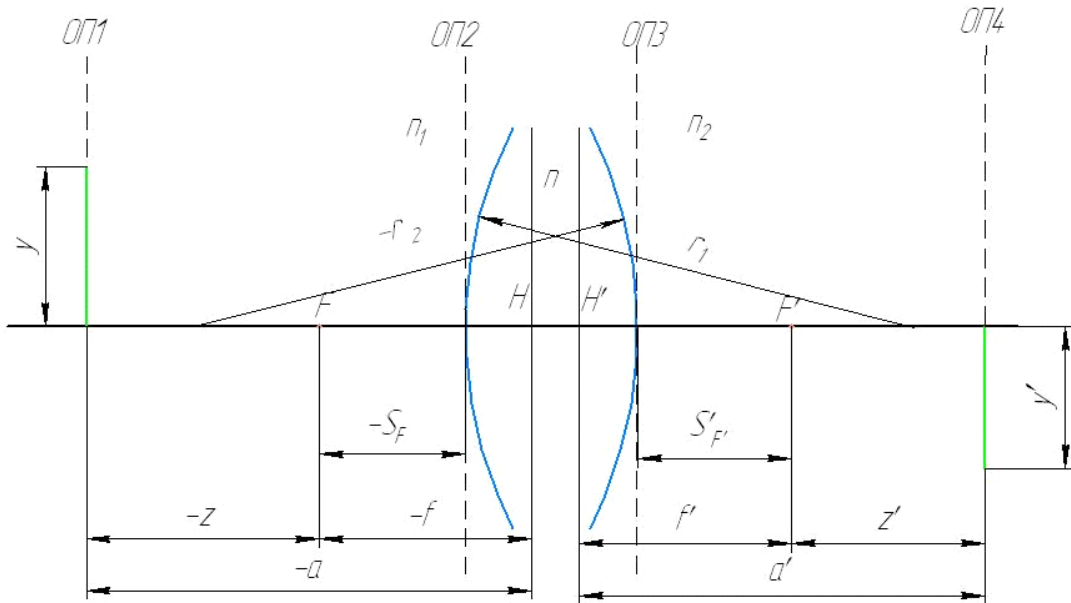


20. Дано оптична система

Яка матриця описує цю оптичну систему

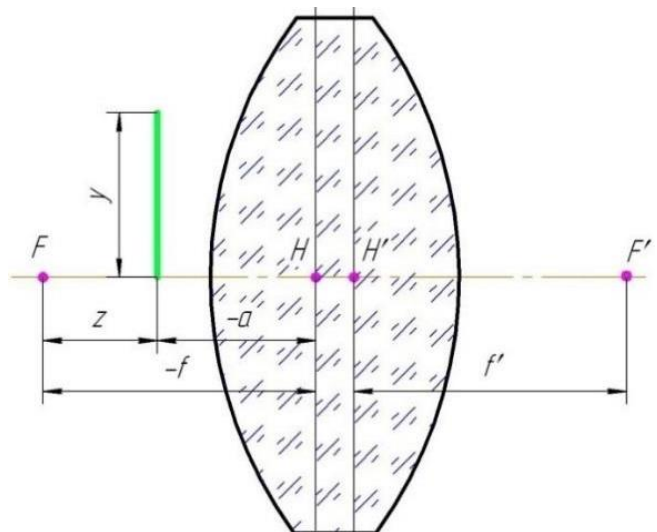


21. Дано оптична система

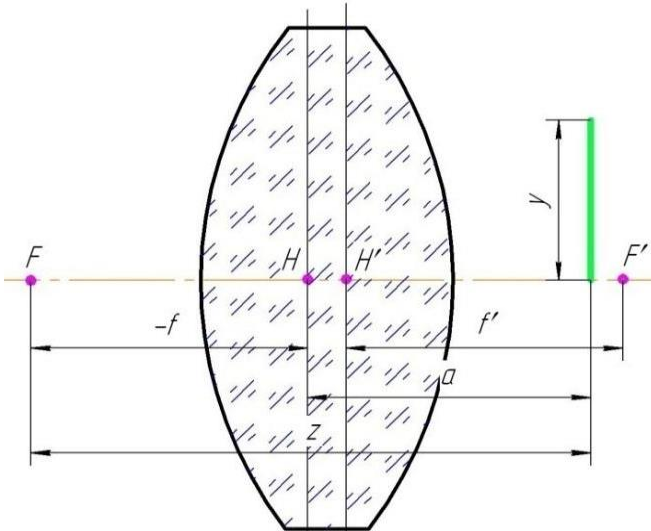


Яка матриця описує цю оптичну систему

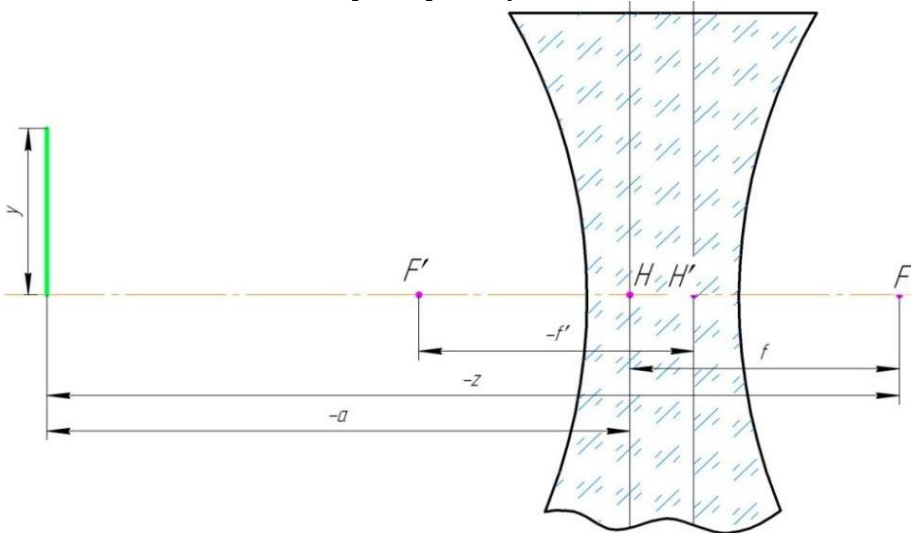
22. Виконати побудову зображення, якщо дано



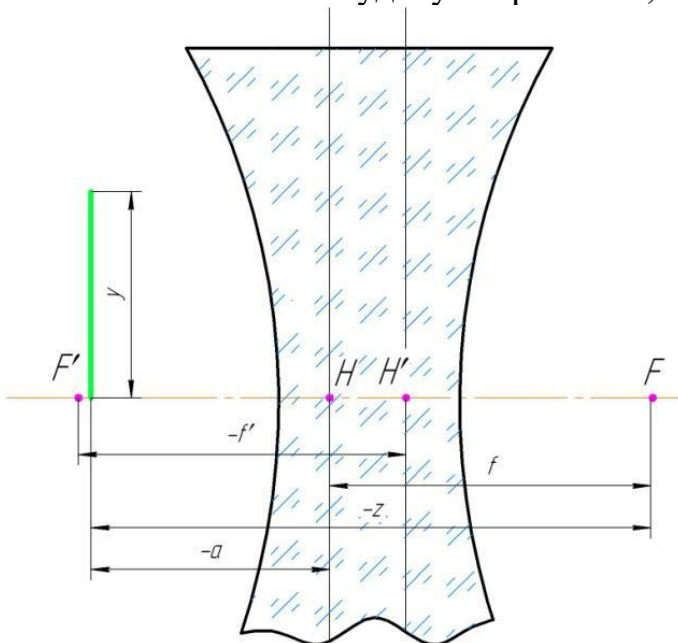
23. Виконати побудову зображення, якщо дано



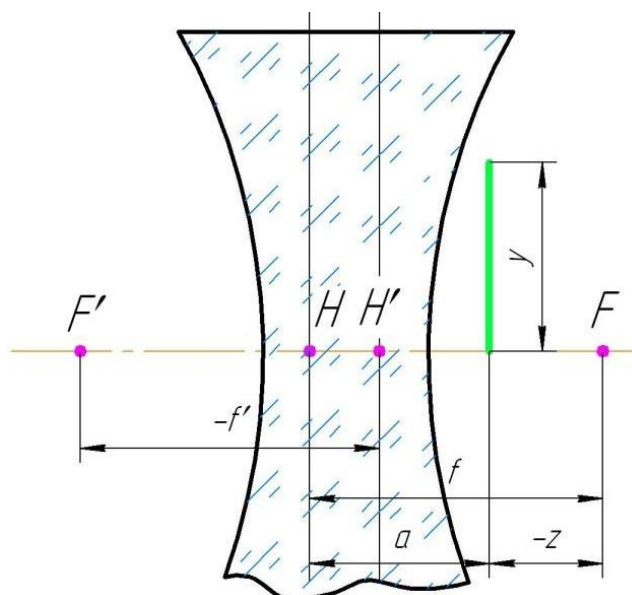
24. Виконати побудову зображення, якщо дано



25. Виконати побудову зображення, якщо дано



26. Виконати побудову зображення, якщо дано



Окрім цього здобувачу запропоновано пройти модульне тематичне тестування, яке розташовано

<https://moodle.chdtu.edu.ua/course/view.php?id=17>. Тести модульного контролю використовуються здобувачем для самоперевірки отриманих знань та для підготовки до підсумкового семестрового іспиту. Кількість спроб для проходження тесту-самоперевірки необмежена, при цьому зараховується кращий із результатів. Вага кожного питання 0,1 бал.

Тематичний (модульний тест) з теми 1, 2 містить 15 питань

Тематичний (модульний тест) з теми 3 – 17 питань

Тематичний (модульний тест) з теми 4 – 19 питань

Тематичний (модульний тест) з теми 5 – 15 питань

Тематичний (модульний тест) з теми 6 – 18 питань

Тематичний (модульний тест) з теми 7 – 39 питань

Тематичний (модульний тест) з теми 8 – 12 питань

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. – 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.

5. Однорець Л. В. Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині: навчальний посібник / Л. В. Однорець, І. М. Пазуха, І. М. Лукавенко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 127 с

6. Шуаїбов О.К. Підручник «Квантова електроніка для інженерів»: – ДВНЗ «УжНУ», кафедра квантової електроніки, фізичний факультет. 2022. – 133 с.