

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ БУРАУ Н.І.

«___» _____ 2025 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»
спеціальності 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Блок коліматора для автоматизованої системи «холодного»
пристрілювання»

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПО-11

Антоненко Ілля Петрович

Керівник:

к. т. н., доцент,

Кучеренко Олег Костянтинівич

Рецензент:

к. т. н., доцент,

Божко Костянтин Михайлович

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Пояснювальна записка	71	
3	A2	ДП.ПО11.01.02.00.00	Оптична схема	1	
4	A3	ДП.ПО11.01.03.00.00	Структурна схема	1	
5	A3	ДП.ПО11.01.04.00.00	Структурна схема	1	
6	A2	ДП.ПО11.01.05.00.00	Схема функціональна	1	
7	A1	ДП.ПО11.01.01.00.00 СБ	Вузол системи холодного пристрілювання	1	
8	A2	ДП.ПО11.01.01.01.00СБ	Вузол коліматора	1	
9	A3	ДП.ПО11.01.01.01.01	Корпус коліматора	1	
10	A4	ДП.ПО11.01.01.01.02	Тримач оправы	1	
11	A3	ДП.ПО11.01.01.01.03	Оправа	1	
12	A4	ДП.ПО11.01.01.01.04	Осьове дзеркало	1	
13	A3	ДП.ПО11.01.01.02.00СБ	Вузол освітлювача	1	
14	A4	ДП.ПО11.01.01.02.01	Корпус освітлювача	1	
15	A3	ДП.ПО11.01.01.03.00СБ	Вузол пента-відбивача	1	
16	A4	ДП.ПО11.01.01.03.01	Дзеркало пента-відбивача	1	
17	A4	ДП.ПО11.01.01.03.02	Кронштейн пента-відбивача	1	
18	A4	ДП.ПО11.01.01.03.03	Направляюча пента-відбивача	1	
19	A3	ДП.ПО11.01.01.04.00СБ	Вузол об'єктива	1	
20	A3	ДП.ПО11.01.01.04.01	Направляюча	1	
21	A4	ДП.ПО11.01.01.04.02	Об'єктив коліматора	1	

				ДП.ПО11 01.000.00		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Антоненко І.П.				1	1
Керівн.	Кучеренко О.К.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІОНС Гр. ПО-11	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.						

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Блок коліматора для автоматизованої
системи «холодного» пристрілювання»**

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма – «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Надія БУРАУ

«___» _____ 20__р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Антоненку Іллі Петровичу

1. Тема проєкту «Блок коліматора для автоматизованої системи «холодного» пристрілювання», керівник проєкту Кучеренко Олег Костянтинович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «___»_2025 р. №

2. Термін подання студентом проєкту: 06.06.2025

3. Вихідні дані до проєкту: діаметр сферичного дзеркала – 50 мм, фокусна відстань коліматора – 200 мм, відстань до плоского дзеркала – 160 мм, діаметр пучка на виході – 50 мм, фокусна відстань об'єктива телевізійної системи – 17 мм, діаметр об'єктива телевізійної системи – 22 мм.

4. Зміст пояснювальної записки: 1.Огляд систем «холодного» пристрілювання і вибір схеми для проєктування. 2. Розрахункова частина 3. Розробка конструкції.

ДП.ПО11.00001.000

ПЗ

Змін..	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
					Блок коліматора для автоматизованої системи "холодного" пристрілювання		
Розраб.		Антоненко І.П.			Лім.	Лист	Листів
Перевірів		Кучеренко О.К.				1	
Н. Контр. Затверд.		Кучеренко О.К.			ПБФ, КІОНС		
					Пояснювальна записка		

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Вузол системи холодного пристрілювання (1л. А1).Вузол коліматора (1л.А2). Корпус коліматора (1л.А3). Тримач оправи (1л.А4). Оправа (1л.А3). Осьове дзеркало (1л.А4). Вузол освітлювача (1л.А3). Корпус освітлювача (1л.А4). Вузол пента-відбивача (1л.А3.). Дзеркало пента-відбивача (1л.А4). Кронштейн пента-відбивача (1л.А4). Направляюча пента-відбивача (1л.А4). Вузол об'єктива (1л.А3). Направляюча (1л.А3). Об'єктив коліматора (1л.А4). Оптична схема (1л.А2). Функціональна схема (1л.А2). Структурна схема (2л.А3).

6. Дата видачі завдання: 14.04.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формування завдання проєкту	14.04.2025	
2	Проведення аналітичного огляду	21.04.2025	
3	Розрахунок компонентів	28.04.2025	
4	Оформлення пояснювальної записки	02.05.2025	
5	Розробка креслеників	18.05.2025	
6	Подання проєкту до передзахисту	09.06.2025	
7	Підготовка до захисту	12.06.2025	

Студент

Ілля АНТОНЕНКО

Керівник

Олег КУЧЕРЕНКО

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.ПО11.00001.000 ПЗ

Лист

2

Анотація

У дипломному проєкті розроблено конструктивно-технологічні рішення для блока дзеркального коліматора в автоматизованій системі «холодного» пристрілювання дистанційно керованих платформ. В роботі здійснено огляд актуальних наукових джерел, досліджено теоретичні та практичні аспекти розробки такої системи для дистанційно керованих бойових роботів. На основі критичного огляду класичних лазерних та ствольних методів юстування обґрунтовано вибір ньютонівської дзеркальної схеми з парою пента-відбивачів, що формує стабільний колімований пучок у видимому та дальньому інфрачервоному діапазонах. Запропонована конструкція забезпечує швидке налаштування прицілів телевізійних і тепловізійних каналів без бойових пострілів, мінімізує вплив паралакса між оптичними та стволовими осями й підвищує мобільність роботизованих бойових модулів. Практична цінність полягає в економії боєприпасів, скороченні часу розгортання та підвищенні безпеки оператора під час укритого налаштування озброєння.

Обсяг роботи: 71 сторінок пояснювальної записки, 23 рисунки, 3 таблиці, 33 бібліографічних найменувань.

Ключові слова: холодне пристрілювання, бойові роботи, лазерний відбивач, ствольний відбивач, блок коліматора, діафрагма, пента-відбивач.

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		3

Annotation

The thesis project develops design and technological solutions for a mirror collimator unit in an automated cold-aiming system for remotely operated platforms. The work reviews relevant scientific sources, investigates the theoretical and practical aspects of developing such a system for remotely controlled combat robots. Based on a critical review of classical laser and barrel alignment methods, the choice of a Newtonian mirror scheme with a pair of penta-reflectors, which forms a stable collimated beam in the visible and far infrared ranges, is justified. The proposed design provides quick adjustment of TV and thermal imaging sights without live fire, minimizes the effect of parallax between the optical and barrel axes, and increases the mobility of robotic combat modules. The practical value lies in ammunition savings, reduced deployment time, and increased operator safety during concealed weapon setup.

Scope of work: 71 pages of explanatory note, 23 figures, 3 tables, 33 bibliographic references.

Keywords: cold firing, combat operations, laser reflector, barrel reflector, collimator unit, aperture, penta-reflector.

					<i>ДП.ПО11.00001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Змін.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		4

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СИСТЕМ «ХОЛОДНОГО» ПРИСТРІЛЮВАННЯ І ВИБІР СХЕМИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ.....	12
1.1. Загальні принципи прицілювання.....	12
1.2. Огляд і принцип дії систем «холодного» пристрілювання	15
1.3. Дзеркальні схеми коліматорів як високоточні імітатори далекої цілі	20
1.4. Самонаведення телевізійних і тепловізійних прицілів: оптичні, сенсорні та алгоритмічні тонкощі	28
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	33
2.1 Обґрунтування структурної, функціональної і оптичної схеми	33
2.2 Габаритний розрахунок оптичної системи коліматора.....	38
2.2.1 Параметри коліматорного дзеркального об'єктива	39
2.2.2 Габарити плоского дзеркала	40
2.2.3 Розрахунок діаметра діафрагми коліматора.....	41
2.2.4 Визначення поля зору	42
2.2.5 Габарити пента-відбивача	43
2.3 Енергетичний розрахунок	44
2.3.1 Визначення втрат випромінювання в оптичній системі блока коліматора	44
2.3.2 Оцінка рівня сигналу з матричного фотоприймача.....	46
Висновки до розділу 2	49
3.1 Вимоги до точності базування коліматора.....	51
3.2 Опис конструкції коліматора	54
3.3 Методика юстування окремих елементів конструкції	59
Висновки до розділу 3	64
Висновок	65
Література	67

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

БМ – бойові модулі

БР – бойові роботи

ІЧ – інфрачервоний

ЛП – лазерний патрон

СК – ствольний коліматор

ТХП – трубка «холодного» пристрілювання

ЛПХП – лазерний прилад «холодного» пристрілювання

ОС – оптична система

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Розвиток дистанційно керованих вогневих платформ – від наземних роботизованих турелей до безпілотних мобільних комплексів – зумовив потребу у принципово нових методах первинного юстування та періодичного контролю оптичних прицілів. Для класичної стрілецької зброї достатньо було встановити телескопічний або коліматорний приціл, вийти на полігон і, спостерігаючи крізь окуляр, скоригувати точку попадання. У випадку бойового робота оператор перебуває поза зоною ураження, а візуальна інформація про ціль надходить від телевізійних або тепловізійних сенсорів, змонтованих на окремій, часто зміщеній відносно ствола оптичній осі. Тому навіть незначний паралакс між віссю каналу ствола і лінією візування телевізійної камери породжує метричні помилки на далеких дистанціях.

Практика показала, що традиційні засоби «холодного» пристрілювання – лазерні патрони, ствольні коліматори чи трубки холодного пристрілювання – спроектовано для ручної зброї: вони формують світловий пучок у напрямку простору цілей і вимагають віддаленого екрана або паперової мішені, розміщеної щонайменше за 25 м від дульного зрізу. Під час бойових дій така відстань недосяжна, а відсутність інфрачервоного діапазону робить ці прилади непридатними для тепловізійних прицілів. Крім того, вага класичного ствольного коліматора та обмежений діапазон бази «приціл – ствол» не дозволяють застосовувати його в компактних роботизованих баштах.

В Україні спостерігається тенденція до розвитку озброєння з використанням дистанційно керованих засобів ураження, таких як безпілотні літальні апарати та бойові роботи. Ці роботи застосовуються для розвідки, інженерних робіт, у бойових діях та для забезпечення тилу. Значна частина цих дистанційно керованих систем оснащена телевізійними та тепловізійними прицілами, камерами та лазерними далекомірами, що забезпечує необхідну функціональність.

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		7

У зв'язку з цим виникає потреба у створенні пристроїв для «холодного» пристрілювання, які дозволять калібрувати приціли різних типів бойових роботів, враховуючи різну відстань між прицілом і зброєю. Система "холодного пристрілювання" дає змогу здійснювати налагодження бойових роботів з зміною в широких межах відстані між стволом бойових роботів і віссю прицілу.

В умовах укритих позицій необхідно забезпечити можливість пристрілювання автоматизованих платформ без жодного пострілу та без виїзду на полігон. Саме цю задачу вирішує запропонована автоматизована система «холодного» пристрілювання з дзеркальним блоком коліматора і парою пента-відбивачів, що симулює візування цілі на необмеженій дальності. Завдяки дзеркальній оптиці система працює одночасно у видимому й інфрачервоному спектрі, дозволяючи юстувати як телевізійні, так і тепловізійні канали без переобладнання. Мобільний монтаж пента-відбивача узгоджує приціл із різними відстанями між оптичною лінією сенсора та стволом, що характерно для модульних роботизованих платформ різного калібру.

Мета дипломного проєкту – розробити практичні рекомендації та конструктивно-технологічні рішення для блока коліматора, який входить до складу автоматизованої системи «холодного» пристрілювання бойових роботів, а також обґрунтувати методику його юстування з мінімальною похибкою на дистанції, еквівалентній 1000 м.

					<i>ДП.ПО11.00001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Змін.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СИСТЕМ «ХОЛОДНОГО» ПРИСТРІЛЮВАННЯ І ВИБІР СХЕМИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ

1.1. Загальні принципи прицілювання

Багато наукових досліджень зосереджено на проблемах проектування прицільних систем для різноманітних цілей [1-4]. У сучасній військовій практиці поняття «холодного» пристрілювання набуває дедалі більшого значення, особливо в контексті великокаліберних систем, що вимагають швидкого й точного налаштування на ціль без попереднього витрачання боєприпасів. Поняття «холодне» пристрілювання визначається, як сукупність технічних і методичних заходів, спрямованих на забезпечення початкового юстування зброї без здійснення пострілу, що уникає витрат снарядів, забезпечує зменшення часу на розгортання вогневих позицій і часто підвищує безпеку оператора. Вперше концепція «холодного» пристрілювання згадується у військово-технічних публікаціях кінця ХХ століття, проте практичний розвиток набула вже на початку 2000-х років у контексті удосконалених оптико-електронних прицільних пристроїв та систем управління вогнем. Більшість історичних джерел, зокрема узагальнення, наведені у виданні “Jane’s Infantry Weapons 2005–2006” та в матеріалах Військового технічного управління армії США, свідчать, що перші спроби застосування «холодного» пристрілювання базувалися переважно на механічних або лазерних вставках, котрі монтувалися безпосередньо в канал ствола. Такі вставки мали забезпечити проєкцію точок візування, що дала б змогу приблизно вирівняти лінію прицілювання зі стволовою. Проте на той час зазвичай не враховувалися більш тонкі фактори, як-от вплив температурних коливань, мікродеформацій та динамічних коливань конструкції кулеметів або гранатометів великого калібру [5].

Згідно зі спостереженнями, викладеними у низці патентів, що стосуються пристроїв «холодного» пристрілювання (наприклад, у патенті США US7347002B2), лазерні вставки були одними з найпоширеніших і найдоступніших рішень [6].

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9

Водночас їх застосування виявило низку недоліків: по-перше, чутливість лазерної системи до коливань температури могла спричинити помітне зміщення плями прицілювання, по-друге, при великих дистанціях стрільби — понад 1000 м для кулеметів Browning калібру 12,7 мм — похибка проєкції значно зростала через розсіювання лазерного променя, і це потребувало додаткових коригувань. Особливої уваги в новітній літературі набуває питання забезпечення стійкості юстування зброї до початку ведення вогню, коли немає можливості здійснити тестовий постріл. Автори низки досліджень, які узагальнено в “Proceedings of the International Conference on Modern Armament Innovations” (видання 2017 року), наголошують, що навіть незначна невідповідність оптичної осі прицілу ствольній осі може призвести до суттєвих помилок при стрільбі на великі дистанції, особливо у випадку застосування 40-мм гранатометів з навісною траєкторією і складною балістикою.

У подальшому розвиток технологій «холодного» пристрілювання спирався на розроблення більш досконалих систем кріплення та юстування, які могли б урахувати геометричні та механічні особливості каналу ствола для конкретних калібрів.

Інший аспект, який висвітлений в оглядах фахівців NATO Allied Land Publications, стосується багатofакторності процесу «холодного» пристрілювання. Зокрема, врахування вітрових навантажень, температури повітря, вологості та інших умов середовища є складовою комплексного підходу до початкової пристрілки. Навіть за умови правильного механічного юстування, відсутність урахування впливу зовнішніх умов може спричинити додаткові кутові похибки до 1–2 мрад. Отже, сучасні системи «холодного» пристрілювання прагнуть інтегрувати не лише оптико-механічну, а й датчикову складову, що дає змогу в реальному часі оцінювати кліматичні параметри й вносити поправки в розташування візирної марки.

Підсумовуючи, можна сказати, що розвиток «холодного» пристрілювання пройшов шлях від простих лазерних вставок і механічних вставок-адаптерів для

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10

каналу ствола до інтегрованих електронно-оптичних модулів, здатних самостійно коригувати кутове положення прицільних марок. Завдяки цьому досягається значна економія боєприпасів, скорочується час на налаштування зброї та, що важливо в умовах реальних бойових дій.

Подальші дослідження, викладені в технічних звітах Міністерства оборони деяких європейських країн, акцентують на тому, що особливої актуальності метод «холодного» пристрілювання набуває у випадках, коли зброю часто переналаштовують чи змінюють позицію. Наприклад, при встановленні великокаліберного кулемета 12,7 мм Browning на різні мобільні платформи (баггі, бронеавтомобілі, корабельні установки), початкову пристрілку доводиться здійснювати повторно. Аналогічна ситуація виникає із 40-мм автоматичними гранатометами, які використовують на турельних установках з електроприводом. У таких випадках наявність швидкої та точної технології «холодного» пристрілювання дозволяє суттєво підвищити оперативність розгортання та зменшити матеріальні витрати. У цілому ж, у новітніх літературних джерелах наголошується на перспективності впровадження саме автоматизованих систем, адже людський чинник та похибки ручного налаштування є одними з найсуттєвіших перешкод на шляху до ідеальної точності.

Отже, хоча системи «холодного» пристрілювання є окремим видом технології, спрямованої на початкове налаштування зброї без стрільби, вони відіграють важливу роль у контексті розвитку озброєння, зокрема бойових роботів. Коліimatorні приціли, завдяки своїм меншим габаритам та ширшому кутовому полю зору, значною мірою витісняють традиційні телескопічні приціли при використанні на бойових роботах. Застосування систем «холодного» пристрілювання є критично важливим для швидкого та точного наведення саме таких компактних коліimatorних прицілів на ціль, забезпечуючи ефективне використання бойових роботів у різних тактичних сценаріях.

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

На сьогоднішній день однією з найважливіших задач є розробка озброєння для дистанційно керованих бойових роботів . Для початкового налаштування лінії прицілювання або регулярної перевірки її положення відносно осі ствола бойового робота застосовуються такі контрольні-вимірювальні засоби: «лазерний патрон», лазерний прилад для «холодного» пристрілювання, трубка «холодного» пристрілювання та ствольний коліматор.

Суть процесу пристрілювання з використанням «лазерного патрона» або лазерного приладу «холодного» пристрілювання зводиться до перевірки співвідношення між перехрестям прицільної марки та центром лазерної точки, яка показує напрямок ствола зброї на віддаленому екрані [7,8]. Оператор, який здійснює пристрілювання, бачить на своєму моніторі лазерну пляму та прицільну марку. У випадку, якщо ці зображення не збігаються, оператор коригує приціл до моменту їхнього суміщення.

У дистанційно керованих бойових роботах та безпілотних наземних платформах людський елемент в оптичному контурі фізично відсутній. Прицілювання здійснюється телевізійною або тепловізійною камерою, що транслює зображення операторові у захищеному пункті керування.

1.2. Огляд і принцип дії систем «холодного» пристрілювання

Однією з ключових світових тенденцій є застосування бойових роботів для розвідки, інженерного забезпечення, ведення бойових дій та виконання тилкових завдань. З огляду на це, в Україні передбачається активний розвиток роботизованих, автономних та дистанційно керованих зразків озброєння та військової техніки різного призначення і базування. Розробка та виготовлення бойових модулів озброєння і спеціалізованого обладнання для їх інтеграції на шасі наземних роботизованих комплексів різних типів є важливим завданням для Збройних Сил України. Переважна більшість цих дистанційно керованих БМ обладнуються телевізійними та тепловізійними прицілами, телевізійними камерами та лазерними далекомірами для забезпечення необхідних функціональних можливостей бойових роботів.

					<i>ДП.ПО11.00001.000 ПЗ</i>	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

На сьогодні для первинного наведення лінії візування прицілу або періодичної перевірки її положення відносно осі каналу ствола зброї застосовується низка контрольно-вимірювальних пристроїв, серед яких: «лазерний патрон», лазерний прилад «холодного» пристрілювання, трубка «холодного» пристрілювання і ствольний коліматор. До цих пристроїв висуваються такі ключові вимоги: мінімальна власна похибка, стабільність конструкції в часі та при різних зовнішніх умовах, відсутність потреби в частих переустановленнях, відносно низька залежність результатів вимірювань від кваліфікації оператора та простота використання.

«Лазерний патрон» являє собою імітатор патрона відповідного калібру зі вбудованим лазером, промінь якого співвісний з корпусом і спрямований на ціль (рис. 1.1). Пристрілювання полягає у порівнянні положення прицільної марки з центром лазерної плями, яка відображає вісь ствола на віддаленому екрані, що відображається на моніторі оператора. У разі розбіжності оператор коригує приціл до суміщення. Для зменшення впливу відстані між прицілом і зброєю (L) на точність, відстань до екрана (D) має бути достатньо великою ($D \geq L / [\delta L]$), що при типовому розсіюванні боєприпасів вимагає не менше 25 метрів. Похибка пристрілювання залежить від точності суміщення прицільної марки та лазерної плями на моніторі, але зазвичай є малою порівняно з розсіюванням боєприпасів. Недоліками «лазерного патрона» є неможливість пристрілювання тепловізійних прицілів та потреба у великому вільному просторі [10].



Рис. 1.1. «Лазерний патрон» [9]

Лазерний прилад «холодного» пристрілювання існує у двох варіантах (рис. 1.2). Перший – це направляюча з прикріпленим лазером, аналогічна за принципом дії «лазерному патрону» з тими ж недоліками. Другий варіант оснащений горизонтальним рівнем. Пристрілювання полягає у порівнянні положення прицільної марки та лазерної плями відносно реперних точок на спеціальній вертикально встановленій мішені на заданій відстані. Враховуючи базову відстань між прицілом і зброєю, цей метод виключає відповідну похибку, але точність залежить від розмітки мішені та точності суміщення на моніторі. Похибка пристрілювання становить близько 0,5 мрад. Недоліками є неможливість пристрілювання тепловізійних прицілів без складної мішені та відсутність жорсткого зв'язку між бойовою машиною та мішенню [9].



Рис. 1.2. Лазерний прилад «холодного» пристрілювання [9]

Трубка «холодного» пристрілювання містить телескопічну візирну систему з сіткою та рівнем на направляючій (рис. 1.3). Пристрілювання полягає у горизонтуванні бойової машини та наведенні осі ствола на пристрілочну мішень. Потім на мішені відзначається розрахункове положення оптичної осі прицілу відносно осі ствола, і оператор суміщає прицільну марку з цією міткою на моніторі. Відстань до мішені також має бути не меншою 0,5м. Основними джерелами похибки є неточність встановлення трубки «холодного» пристрілювання у ствол, похибки візування та відліку по сітці трубки «холодного» пристрілювання. Недоліками є

складність операцій та обмеження, схожі з лазерним приладом «холодного» пристрілювання [9].

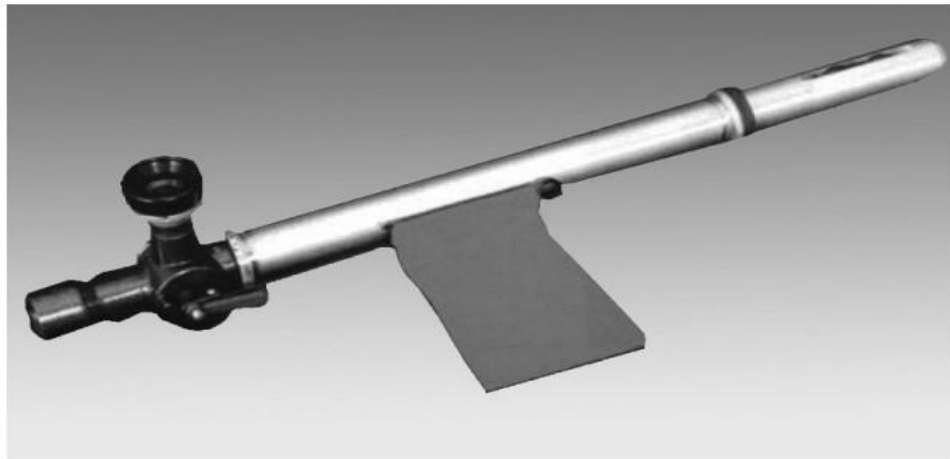


Рис. 1.3. Трубка «холодного» пристрілювання [9]

Важливим недоліком лазерного патрону, лазерного приладу «холодного» пристрілювання і трубки «холодного» пристрілювання є те, що їх вихідна зіниця спрямована у простір цілей, що вимагає використання екрана або мішені, що не завжди зручно в бойових умовах. Крім того, всі ці прилади працюють у видимому спектрі, що унеможливує пристрілювання тепловізійних прицілів.

З цієї точки зору перевагу мають ствольні коліматори, вихідна зіниця яких спрямована в бік прицілу (рис. 1.4). Традиційний ствольний коліматор містить оптичний коліматор з сіткою у фокальній площині та масивний кронштейн для кріплення до ствола. Пристрілювання полягає у суміщенні перехрестя прицільної марки з перехрестям сітки коліматора на моніторі оператора. Похибка визначається неточністю встановлення ствольного коліматора у ствол, похибкою суміщення на моніторі та дискретністю сітки ствольного коліматора. Основними недоліками є велика маса кронштейна для великих відстаней між прицілом і стволом та відсутність універсальності для різних роботизованих комплексів з різними значеннями цієї відстані.

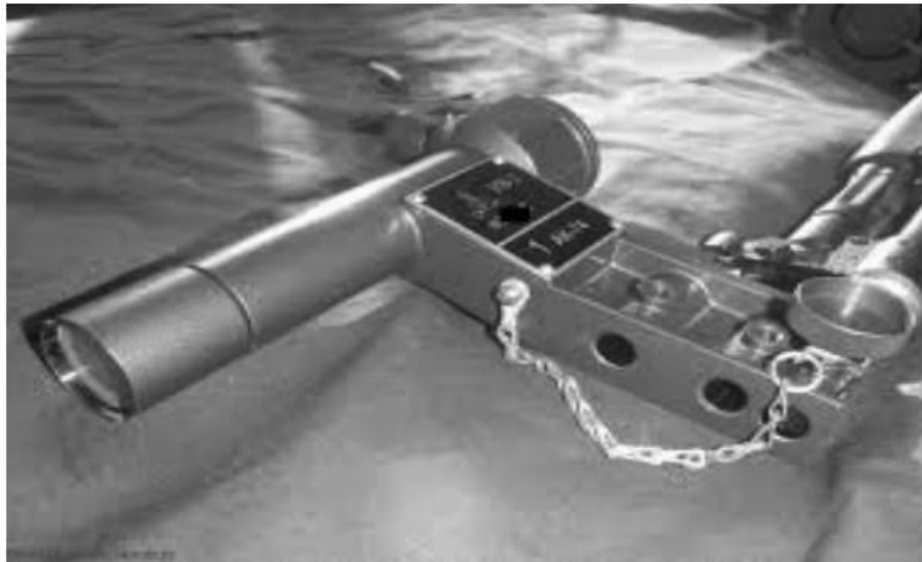


Рис. 1.4. Ствольний коліматор [9]

Для подолання цих недоліків розробляються нові конструкції ствольних коліматорів, що базуються на дзеркальних коліматорах. Запропонована схема включає дзеркальний коліматор, який кріпиться до калібрувального стрижня, та дзеркальний вузол, що містить два пента-дзеркала. Перше пента-дзеркало, розташоване на оптичній осі коліматора, відбиває її на 90° . Друге пента-дзеркало, розміщене на відбитій осі з можливістю регулювання базової відстані, відбиває оптичну вісь ще на 90° у напрямку прицілу. Ключовою особливістю пента-дзеркала є стабільність кута 90° між вхідним і вихідним променями незалежно від його орієнтації, що забезпечує колінеарність відбитої оптичної осі коліматора та осі каналу ствола навіть при зміні базової відстані. Точність "холодного" пристрілювання з таким ствольним коліматором визначається переважно точністю суміщення перехрестя прицілу та мітки, сформованої коліматором, оскільки похибками виготовлення сучасних пента-дзеркал можна знехтувати. Таким чином, ствольний коліматор запропонованої конструкції є універсальним для різних базових відстаней і дозволяє пристрілювати приціли, що працюють як у видимому, так і в дальньому інфрачервоному діапазонах спектру, підвищуючи універсальність системи [11].

Підсумовуючи огляд і принцип дії систем "холодного" пристрілювання, можна зазначити, що на сьогодні існує низка контрольно-вимірювальних пристроїв, кожен з яких має свої переваги та недоліки щодо точності, зручності використання та універсальності. Такі пристрої, як лазерні патрони, лазерні прилади "холодного" пристрілювання та трубки "холодного" пристрілювання, хоча й прості у використанні, мають обмеження, зокрема щодо можливості пристрілювання тепловізійних прицілів та необхідності використання зовнішніх екранів або мішеней. Ствольні коліматори, вихідна зніця яких спрямована на приціл, є більш перспективними, проте традиційні конструкції можуть бути громіздкими та не універсальними для різних роботизованих платформ. У зв'язку з цим розробка та впровадження дзеркально-коліматорних систем з використанням пента-дзеркал представляє значний крок вперед, забезпечуючи точне, універсальне та зручне "холодне" пристрілювання для широкого спектру оптико-електронних прицілів, включаючи тепловізійні, на бойових робототехнічних комплексах з різними базовими відстанями між прицілом і зброєю.

Отже, розвиток дистанційно керованих бойових платформ і сучасних оптичних систем вимагав переходу від класичних лазерних технологій до високоточних дзеркальних систем колімації, що забезпечують комплексне вирішення задач пристрілювання як для телевізійних, так і для тепловізійних каналів на полі бою.

1.3. Дзеркальні схеми коліматорів як високоточні імітатори далекої цілі

У пристроях «холодного» пристрілювання бойових роботів важливо забезпечити створення світлового пучка, який імітує ціль на нескінченній відстані. Для цього широко використовуються дзеркальні оптичні схеми, запозичені із конструкцій астрономічних телескопів, оскільки саме такі схеми дозволяють створити колімоване (паралельне) випромінювання високої якості без значних аберацій.

Поряд із дзеркально-лінзовою частиною коліматора ключову роль у створенні паралельного пучка відіграє джерело випромінювання. Від його спектральних і

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		17

габаритних характеристик залежать:

- видимість тестової мітки у телевізійному каналі;
- чутливість алгоритмів автонаведення;
- теплова / електрична сумісність з оптико-механічним блоком.

Для універсальної системи «холодного» пристрілювання потрібні два незалежні типи випромінювачів: [24,25]

1. VIS-LED ($\lambda \approx 520\text{--}650$ нм) — забезпечує юстування телевізійних і денних оптичних прицілів;

2. IR-джерело ($\lambda \approx 850$ нм або 8–12 μm) — формує мітку для тепловізійних каналів.

Для даної системи «холодного» пристрілювання можна вибрати світлодіоди, такі як LL-504PGC1E-G5-1C, який випромінює зелене світло з піковою довжиною хвилі 525 нм, забезпечуючи типову світлову потужність від 12 до 18 мкд при струмі 20 мА. Цей світлодіод має циліндричний корпус діаметром 5 мм та висотою 8,6 мм, а пряме падіння напруги на ньому становить 3,1 В при тому ж струмі. З кутом випромінювання у 30° , він характеризується як добре помітна мітка для використання в денних умовах з телевізійними прицілами.

Іншим варіантом є світлодіод OSRAM OSTAR Stage LE RTDUW S2W, що випромінює червоне світло з піковою довжиною хвилі 635 нм і має високу потужність у 350 мВт при прямому струмі 700 мА у безперервному режимі. Його корпус має компактні розміри $4,6 \times 3,0 \times 1,0$ мм, а пряме падіння напруги становить 2,0 В при струмі 20 мА. Зазначається його компонувальна сумісність із друкованими платами, і він рекомендується для застосувань, де потрібна висока яскравість при сонячному освітленні.

Причини вибору LL-504PGC1E-G5-1C [26]:

- стандартний T-1 3/4 корпус легко юстується по осі дзеркала Ньютона;
- випромінювальна поверхня $\varnothing 2$ мм дає дифузну мітку без «гарячої» точки;
- тепловиділення ~ 60 мВт ($I_F = 20$ мА) не вимагає активного радіатора;
- спектральний максимум 525 нм розташований у зоні пікової чутливості CCD-матриць (≈ 540 нм).

										Лист
										18
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ПО11.00001.000 ПЗ					

Для IR-каналу (тепловізор 8–14 $\mu\text{м}$) класичних світлодіодів поки немає, тож у дослідному зразку використано micro-blackbody IR-55, який у режимі модуляції 5 Гц створює контрастну мітку на матриці мікроболометра. Якщо ж тепловізор підтримує NIR-підканал (0,8–1,0 $\mu\text{м}$), доцільно ставити SFH 4715 A — тоді енергоспоживання знижується вчетверо, а пучок можна модулювати ШІМ-сигналом контролера STM32.

Таким чином, додавання двоканальної підсистеми випромінювачів (LL-504PGC1E-G5-1C у VIS та SFH 4715 A або IR-55 у IR) забезпечує повну сумісність коліматора із телевізійними й тепловізійними прицілами, не порушуючи компактність схеми Ньютона й залишаючись у межах габариту джерела ≤ 5 мм, заданого у конструкторській частині.

Конструктивно для формування паралельного пучка в автоматизованій системі «холодного» пристрілювання застосовується класична дзеркальна схема Ньютона (рис. 1.5). Схема складається з головного увігнутого дзеркала та плоского вторинного дзеркала, розташованого під кутом 45° до оптичної осі [12]. Плоске дзеркало, сприймає пучок світлових променів від джерела і направляє його на головне дзеркало, а головне дзеркало вже формує паралельний пучок на виході в нескінченність. Використання лише дзеркальних поверхонь усуває хроматичні аберації, що дозволяє працювати як у видимому (0,4–0,7 $\mu\text{м}$), так і в далекому інфрачервоному діапазоні (8–14 $\mu\text{м}$). Простота механічної конструкції, мала маса та висока оптична якість визначили вибір саме такої схеми для базового блоку коліматора.

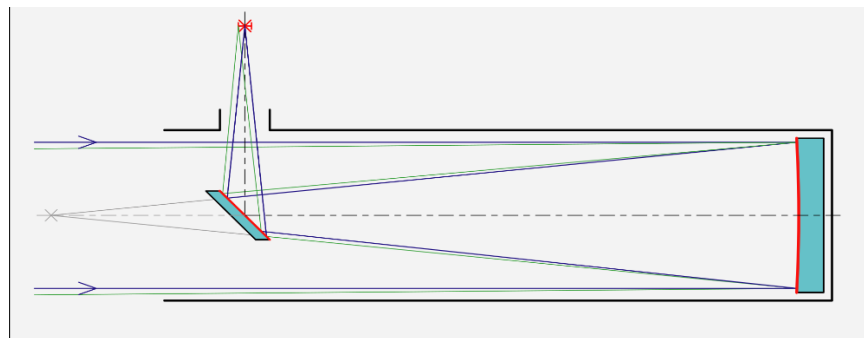


Рис. 1.5. Схема Ньютона [14]

Ньютонівська схема має свої переваги та недоліки. До переваг належить відсутність хроматизму завдяки дзеркальній оптиці. Також, зазвичай, за ту ж ціну можна отримати більшу апертуру, що покращує збір світла та видимість слабких об'єктів. Простота виготовлення дзеркал робить такі коліматори економічно вигіднішими. Конструкція дозволяє мати широке поле зору, корисне для огляду великих ділянок. Малі моделі можуть бути досить компактними та зручними для транспортування.

Серед недоліків варто відзначити втрату контрасту через вторинне дзеркало та його кріплення, які блокують частину світла. Необхідність періодичної колімації (вирівнювання дзеркал) для оптимальної якості зображення може бути складною для початківців. [14].

Інший варіант – схема Гершеля – передбачає використання лише одного нахиленого параболічного дзеркала без вторинного елемента. Головне дзеркало нахиляється на невеликий кут, що дозволяє спостерігати джерело збоку без використання плоского відхиляючого дзеркала. Основною перевагою цієї схеми є повна відсутність центрального затемнення, що забезпечує трохи вищу світлову ефективність і контрастність. Проте такий нахил дзеркала вводить астигматизм і певні геометричні аберації, що може негативно позначатися на точності юстування прицілу. Тому схема Гершеля рідше застосовується у високоточних коліматорах [12] (рис. 1.6).

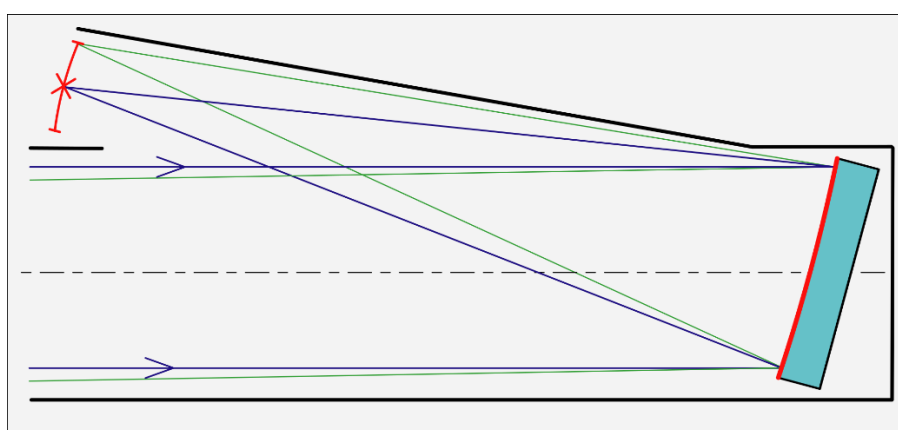


Рис. 1.6. Схема Гершеля [14]

Нарешті, одним із найскладніших, але й найефективніших варіантів є рефлектор Кассегрена. У класичному варіанті ця схема включає велике параболічне головне дзеркало та маленьке випукле гіперболічне вторинне дзеркало. Після відбиття від головного дзеркала промінь фокусується на вторинному, яке перенаправляє його через центральний отвір у головному дзеркалі до джерела. Така схема дозволяє створити дуже довгий еквівалентний фокус у відносно короткому фізичному корпусі, що ідеально підходить для компактних високоточних систем. Перевагами конструкції Кассегрена є відмінна корекція сферичних аберцій та мінімізація розмірів пристрою за збереження високої фокусної відстані. Недоліком є складність виготовлення і юстування обох дзеркал, а також наявність невеликого центрального затемнення через вторинне дзеркало [15] (рис. 1.7).

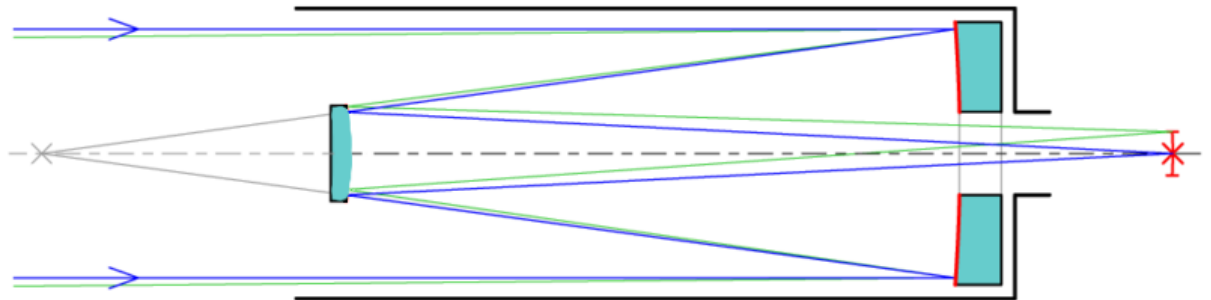


Рис. 1.7. Схема Кассегрена [14]

Система Грегорі використовує два увігнутих дзеркала: головне (параболічне) збирає світло та фокусує його перед вторинним (еліпсоїдальним) дзеркалом. Останнє відбиває світло назад через отвір у центрі головного дзеркала, формуючи джерело в нижній частині коліматора.

Ця конструкція вирішила проблему спостереження в рефлекторах, дозволивши розмістити джерело за головним дзеркалом. Важливою перевагою системи Грегорі є створення прямого (неперевернутого) джерела, що робить його зручним для наземних спостережень. Він також має властивості телеоб'єктива, оскільки довжина труби значно менша за фокусну відстань системи.

Хоча грегоріанська схема значною мірою поступилася популярністю конструкції Кассегрена, вона все ще використовується в деяких спеціалізованих областях [16].

Ключова відмінність грегоріанського рефлектора полягає в тому, що його вторинне еліптичне дзеркало розміщене за фокусом головного дзеркала. Саме таке розташування забезпечує пряме (неперевернуте) джерело, на відміну від перевернутого джерела в ньютонівській системі. Окрім того, використання вторинного дзеркала в коліматорній системі Грегорі призводить до збільшення ефективної фокусної відстані, що надає можливість отримувати більші збільшення при спостереженнях [13] (рис. 1.8).

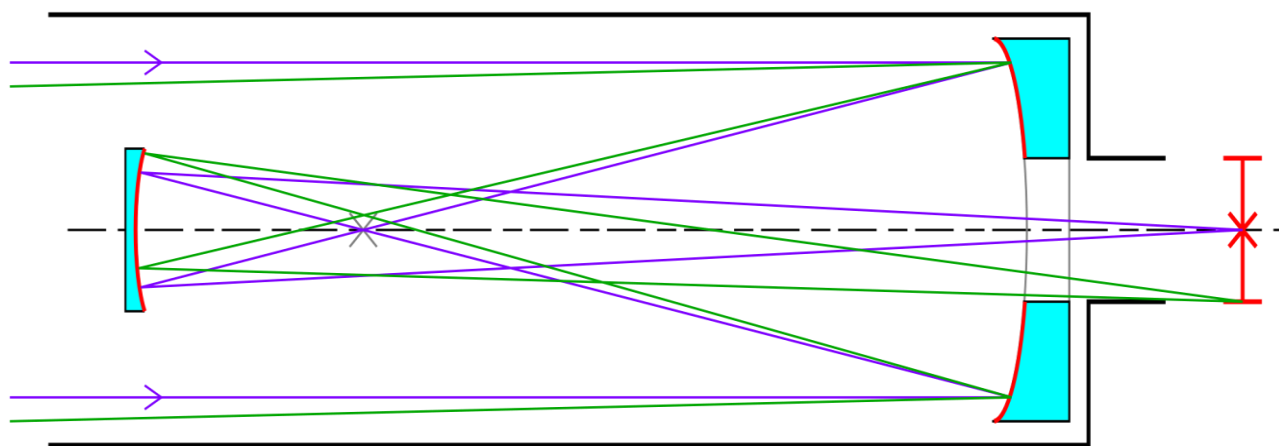


Рис. 1.8. Схема Грегорі [14]

Схема Річі-Кретьєна— це дводзеркальна система, яка, на відміну від ньютонівських систем з їхніми абераціями (кома, сферична аберація, астигматизм), позбавлена коми третього порядку та сферичної аберації. Однак схема Річі-Кретьєна має кому п'ятого порядку, значний астигматизм на великих кутах поля зору та кривину поля. Ці залишкові аберації можуть бути зменшені за допомогою додаткових лінз біля фокальної площини, що робить схема Річі-Кретьєна придатним для ширококутних астрофотографічних спостережень.

Системи Кассегрена, схема Річі-Кретьєна вирізняється короткою оптичною трубою та компактністю. Використання двох несферичних дзеркал дозволяє значно збільшити корисне поле зору порівняно з однодзеркальними системами. Для подальшого усунення астигматизму можуть застосовуватися додаткові криволінійні оптичні елементи або лінзи перед фокальною площиною, забезпечуючи поле зору до 3° .

Варто зазначити, що вторинне дзеркало в схемі Річі-Кретьєна, як і в інших системах Кассегрена, створює центральне екранування апертури, що може призвести до зниження контрасту джерела на низьких просторових частотах порівняно з коліimatorними системами з повною апертурою (наприклад, рефракторами). Крім того, опори вторинного дзеркала можуть спричинити дифракційні ефекти. Попри це, завдяки своїм оптичним характеристикам поза віссю, конфігурація Річі-Кретьєна є основним вибором для багатьох високопродуктивних професійних коліimatorних систем [17] (рис. 1.9).

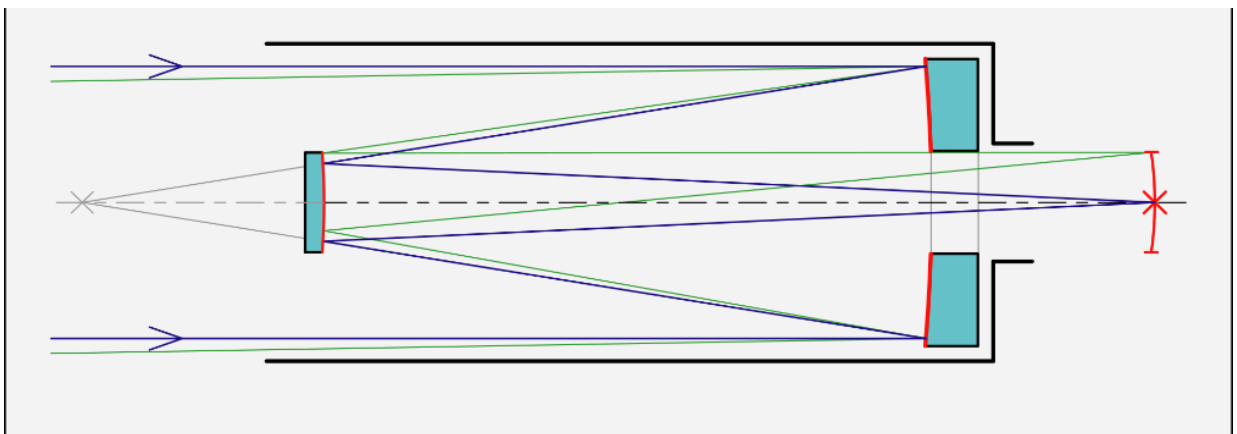


Рис. 1.9. Схема Річі-Кретьєна [14]

Ньютонівська схема заслужено вважається однією з найкращих завдяки своєму неперевершеному співвідношенню ціни та апертури. Жодна інша оптична схема не може запропонувати такий великий діаметр світлозбирального дзеркала за подібні кошти.

Крім того, ньютонівські системи повністю позбавлені хроматичної аберації, кольорової проблеми, яка може суттєво зіпсувати джерело в лінзових коліматорних системах. Хоча інші схеми, такі як Кассегрен чи Річі-Крет'єн, пропонують кращі характеристики щодо коми або компактності, вони зазвичай значно дорожчі для досягнення порівнянної апертури. Грегоріанська схема, хоч і дає пряме джерело, менш поширена і може мати свої оптичні компроміси.

Таким чином, простота конструкції, відсутність хроматизму та виняткова економічність при великій апертурі роблять ньютонівську схему оптимальним вибором для багатьох, забезпечуючи найкращий баланс між можливостями та вартістю.

У табл. 1.1 представлено порівняльний аналіз ключових дзеркальних схем, що використовуються в системах холодного пристрілювання.

Таблиця 1.1

Параметр	Ньютон	Гершель	Кассегрен
Кількість дзеркал	2	1	2
Хроматична аберація	Відсутня	Відсутня	Відсутня
Сферична аберація	Низька	Вища через нахил	Компенсована
Центральне затемнення	Є	Немає	Є
Виготовлення	Просте	Просте	Складне
Компактність конструкції	Середня	Висока	Дуже висока
Світловий вихід	Добрий	Вищий	Добрий

Аналізуючи дані таблиці, можна зробити висновок, що схема Ньютона є оптимальним вибором для більшості автоматизованих систем «холодного» пристрілювання, оскільки вона поєднує в собі простоту, достатню точність і універсальність використання. Тому для створення компактного та високоточного дзеркального блока холодного пристрілювання у дипломному проекті вибрана саме схема Ньютона.

1.4. Самонаведення телевізійних і тепловізійних прицілів: оптичні, сенсорні та алгоритмічні тонкощі

У сучасних бойових роботизованих системах телевізійні та тепловізійні приціли є основними каналами цілевказання та прицілювання, оскільки забезпечують високу дальність виявлення і точність наведення за різних погодних умов. Принцип роботи цих прицілів базується на поєднанні оптичних систем збору випромінювання, високочутливих сенсорів та цифрових алгоритмів обробки зображення

Тепловізійний приціл було розроблено для значного покращення точності стрільби та надійного виявлення цілі. Фахівці вважають його надзвичайно універсальним приладом, що практично виключає можливість промаху. Оскільки всі живі об'єкти, а в деяких випадках і неживі, випромінюють інфрачервоні промені, приціл дозволяє бачити їх розташування незалежно від погодних умов та рівня освітлення.

Тепловізійний приціл є спеціалізованим обладнанням, яке ефективно розпізнає теплове випромінювання будь-яких об'єктів, що потрапляють в поле зору. На основі отриманих даних вбудований процесор створює зображення, яке сприймається людиною. Залежно від моделі, теплові хвилі можуть відображатися в чорно-білому або кольоровому форматі. Основний принцип дії приладу ґрунтується на різниці температур між живими та неживими об'єктами. Тепловізійний приціл оснащений спеціальним джерелом випромінювання, який є ключовим елементом пристрою. Прилад зчитує інфрачервоні імпульси та перетворює їх на електричні сигнали, що формують теплові контури цілі. Навіть якщо ціль намагається сховатися в кущах або за іншими перешкодами, вона не зможе уникнути виявлення тепловізором [22].

Серцем тепловізора є теплочутлива матриця, яка фіксує інфрачервоне випромінювання та перетворює його на електричні сигнали. Електроніка приладу обробляє ці сигнали, створюючи на екрані теплову картину. Оскільки різні об'єкти та речовини мають різну здатність проводити тепло, на тепловому зображенні вони виглядають як різні кольори або відтінки, що дає змогу їх розрізняти[23].

Тепловізійні камери, оснащені висококонтрастними мікродисплеями, є важливим інструментом як у військових цілях, так і в різноманітних дослідженнях. Їх міцний металевий корпус забезпечує стійкість до засобів радіоелектронної боротьби, механічних пошкоджень та складних погодних умов.

Тепловізори працюють незалежно від освітлення, фіксуючи лише інфрачервоне випромінювання об'єктів. Їх оптична система використовує германієві лінзи, оскільки звичайне скло не пропускає інфрачервоне випромінювання. Інформація з матриці приладу обробляється електронною системою, яка створює кольорову карту температур (де кожна температура відображається певним кольором та яскравістю) і виводить її на дисплей. Найчастіше застосовується чорно-біле кодування.

Сучасні тепловізори можуть обчислювати та передавати координати джерела випромінювання, розраховувати інтенсивність інфрачервоне випромінювання та визначати температурні характеристики. Різноманітні параметри об'єктів можна оцінювати за будь-якими цифровими показниками тепловізорів, представленими у вигляді графічного зображення [19].

Завдяки розробці нових фотоприймачів та передовим технологіям у виробництві матеріалів і покриттів, стало можливим створення систем, що охоплюють широкий спектральний діапазон хвиль. На сьогоднішній день найчастіше мультиспектральні системи створюються шляхом об'єднання в одному приладі кількох каналів, кожен з яких працює у своєму спектральному діапазоні та виконує різні завдання, такі як прицілювання та спостереження, вимірювання відстані, а також спеціалізовані вузьконаправлені функції. Ці можливості дозволяють говорити про "інтелектуальність" пристрою, адже він може самостійно здійснювати пошук, розпізнавання та супроводження об'єктів[20].

Використання декількох спектральних каналів в оптико-електронних приладах, разом зі швидкими обчислювальними системами для обробки великого обсягу даних, що надходять від цих багатоканальних систем, дозволяє в режимі

реального часу більш ефективно виявляти, розпізнавати та ідентифікувати різноманітні об'єкти, що є важливим для потреб Збройних Сил України.

Ніч завжди ускладнювала бойові дії, а погана видимість (туман, дим, сніг) робила спостереження майже неможливим. Раніше для виявлення противника в темряві використовували прилади нічного бачення. Однак принцип роботи тепловізора забезпечує значні переваги для спостереження. Прилади нічного бачення фіксують видиме світло, підсилюють його і таким чином дозволяють бачити в умовах слабого освітлення. Проте, на відміну від тепловізора, використання приладів нічного бачення у складних погодних умовах не є ефективним – вони лише підсилюють перешкоди, а в повній темряві стають безкорисними [21]

У тепловізійних прицілах використовуються об'єктиви на основі матеріалів, прозорих у середньо- та довгохвильовій інфрачервоній області спектра (8–14 мкм), таких як германій або сульфід цинку. На відміну від видимого світла, теплове випромінювання має меншу інтенсивність, тому оптична система повинна мінімізувати втрати енергії та бути високоапертурною (типові відношення діафрагми F/1,0–F/1,5). Це дозволяє забезпечити високу чутливість тепловізійного прицілу навіть при слабкому тепловому контрасті об'єкта [18].

У тепловізійних каналах роль приймача світлового потоку виконує ПЗЗ (CCD) або КМОН (CMOS) матриця. Матриці високої роздільної здатності (від 2 до 8 Мп) дозволяють чітко фіксувати дрібні деталі цілей, а глобальний затвор у КМОН-сенсорах забезпечує відсутність спотворень при швидкому русі платформи. В роботі використано матрицю Sony ICX445AQA CCD. Тип - CCD, 2/3" (~11 мм діагональ), активна область 8.8×6.6 мм, 3264×2448 (8 МП), піксель 3.45 мкм. [29].

Тепловізійні системи використовують мікроболометричні матриці без активного охолодження або з активною термостабілізацією. Типовий розмір пікселя складає 12–17 мкм, а роздільна здатність – від 320×240 до 1280×1024 елементів [19]. Якісна тепловізійна матриця забезпечує виявлення різниці температур між об'єктом і фоном у межах від 30 до 50 мК (міліКельвінів) [18].

Алгоритмічна обробка отриманого джерела є ключовим компонентом сучасних прицільних систем. Після формування оптичного джерела на матриці дані передаються на цифровий процесор обробки, який реалізує такі основні функції [18]:

- детекція цілі: виявлення потенційних об'єктів у полі зору за ознаками контурів, температурних аномалій або інших характеристик;
- трекінг цілі: відстеження руху виявленого об'єкта в реальному часі із застосуванням алгоритмів кореляції або адаптивних фільтрів (наприклад, Калмана);
- розрахунок корекції наведення: визначення поправок на положення платформи для точного суміщення прицільної марки з ціллю.

Для підвищення точності супроводу часто використовуються глибокі нейронні мережі (типу RetinaNet або YOLO), натреновані на великих масивах зображень військових цілей [22]. Нейромережевий аналіз дозволяє враховувати не тільки форму об'єкта, а й інші ознаки, такі як тепловий контраст або характер руху.

Важливою характеристикою для систем самонаведення є затримка обробки (latency). Високоєфективні приціли мають затримку не більше 30 мс між реєстрацією кадру та зміною положення приводу платформи, що забезпечує стабільне наведення навіть на швидкорухомі цілі [22].

Структура процесу автоматичного наведення прицілу у бойовому роботі включає типовий цикл, що складається з таких етапів:

1. Формування первинного джерела (телевізійного або тепловізійного каналу).
2. Детекція цілі на основі контурів або температурного профілю.
3. Ініціалізація супроводження об'єкта.
4. Постійне оновлення координат цілі та розрахунок поправок.
5. Автоматичне коригування положення платформи або прицільного маркера.
6. Контроль збіжності перехрестя з виявленою ціллю.

Система автоматичного наведення інтегрується з блоком коліматора для перевірки коректності юстування: спеціальна тестова мітка проектується в об'єктив, а програмне забезпечення перевіряє збіг її з електронним перехрестям прицілу.

Таким чином, застосування високочутливих сенсорів, адаптивної оптики і розвинених алгоритмів обробки дозволяє сучасним бойовим роботам досягати точності наведення на рівні 0,15 мрад навіть у складних умовах експлуатації.

					<i>ДП.ПО11.00001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Змін.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		29

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування структурної, функціональної і оптичної схеми

Автоматизована система холодного пристрілювання використовується для попереднього налаштування (пристрілювання) вогнепальної зброї без здійснення реального пострілу. Її основне призначення — співвісне налаштування прицілу зі стволом зброї з високою точністю, економією ресурсів та безпечністю.

Структурну схему автоматизованої системи пристрілювання зображено на рис. 2.1.

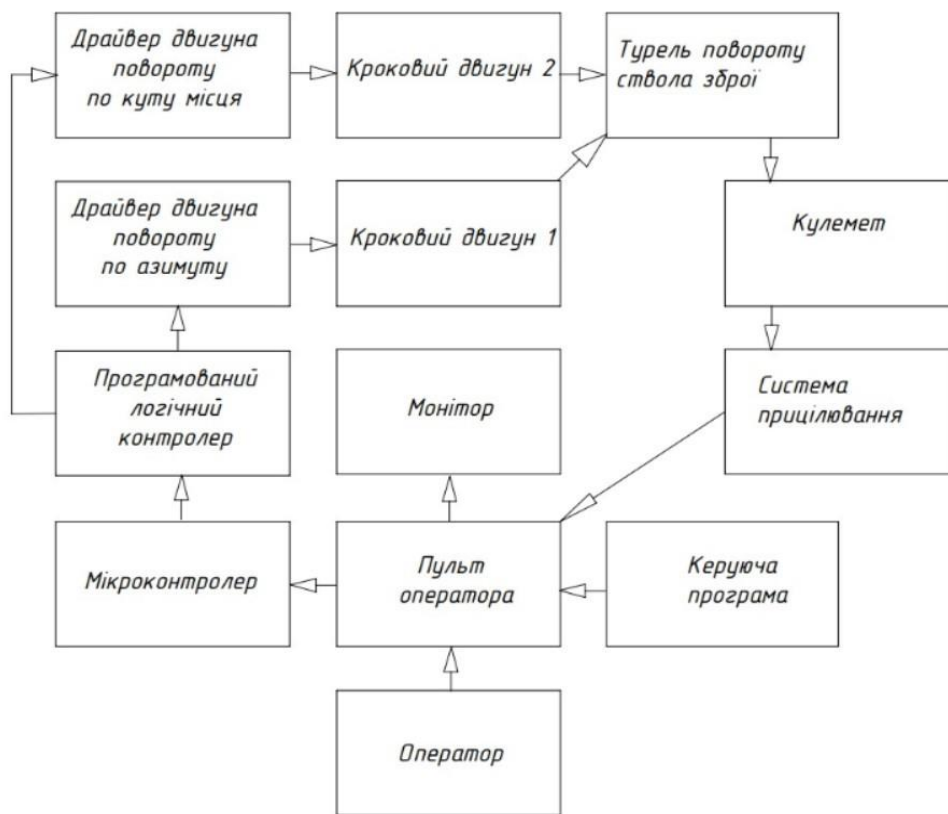


Рис. 2.1. Структурна схема автоматизованої системи пристрілювання

Автоматизоване керування процесом "холодного" пристрілювання здійснюється за допомогою операторського пульта, який дозволяє вводити необхідні програми. Візуальний контроль за режимом роботи та дистанційне керування цим процесом забезпечується монітором. Задачі ж, пов'язані з визначенням напрямку руху та кута повороту, виконує програмований логічний контролер.

Структурна схема оптико-механічної частини системи "холодного" пристрілювання має вигляд приведений на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Структурна схема оптико-механічної частини системи "холодного" пристрілювання

Структурна схема показує організацію пристрою для «холодного» пристрілювання, ілюструючи, як компоненти об'єднані для вивірки прицільної системи кулемета. Основою конструкції є направляюча ствола, виготовлена відповідно до калібру кулемета, яка встановлюється в канал ствола. До направляючої приєднаний блок коліматора, що формує паралельний пучок променів із зображенням, створеним діафрагмою. Цей блок складається з джерела випромінювання, діафрагми, осьового дзеркала та дзеркального об'єктива коліматора. Пучок променів із блоку коліматора надходить до вузла пента-відбивачів, який включає два пента-відбивачі, кожен із яких змінює напрям променів на 90 градусів. Система завершується вузлом прицілювання, де об'єктив і фотоприймальний пристрій фокусують зображення, створене діафрагмою, разом із прицільною маркою для відображення на моніторі оператора.

Взаємодія елементів. Направляюча ствола позиціонує пристрій у каналі ствола, забезпечуючи базове вирівнювання. Блок коліматора створює зображення діафрагми, яке через пента-відбивачі передається до вузла прицілювання. У вузлі прицілювання зображення діафрагми та прицільної марки відображаються разом, дозволяючи оператору порівняти їхнє розташування та, за потреби, скоригувати приціл. Така структура визначає послідовність компонентів для виконання вивірки.

Функціональна схема оптико-механічної частини системи показана на рис. 2.3.

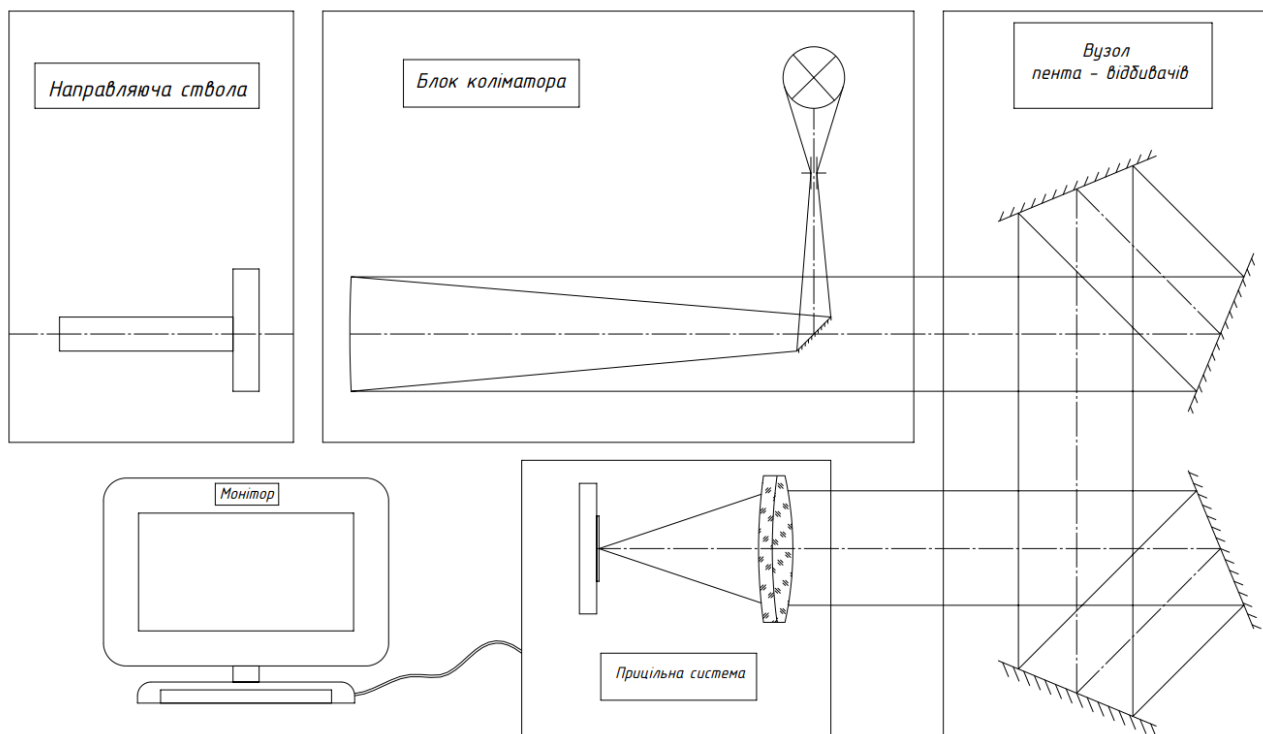


Рис.2.3. Функціональна схема

Функціональна схема описує процеси, що відбуваються в пристрої під час «холодного» пристрілювання, розкриваючи роль кожного компонента. Робота починається з направляючої ствола, яка фіксує пристрій у каналі ствола кулемета. У блоці коліматора джерело випромінювання генерує світловий потік, що підсвічує діафрагму, яка формує пучок променів. Світло від діафрагми спрямовується через плоске осьове дзеркало на дзеркальний об'єктив коліматора, який створює паралельний пучок променів із зображенням точки. Цей пучок надходить до першого пента-відбивача, який змінює його напрям на 90 градусів і передає до другого пента-відбивача. Другий пента-відбивач знову перенаправляє світловий

потік на 90 градусів. Пучок потрапляє у вузол прицілювання, де об'єктив фокусує зображення точки на фотоприймальному пристрої. На моніторі оператора відображаються зображення точки від діафрагми та прицільна марка, які оператор суміщає за потреби.

Взаємодія елементів. Світловий потік проходить від джерела випромінювання через діафрагму, дзеркала та об'єктив коліматора, формуючи пучок, який пента-відбивачі спрямовують до прицільної системи. Об'єктив прицільної системи та фотоприймальний пристрій забезпечують відображення зображення для вивірки. Використання дзеркальної оптики дозволяє системі працювати у видимому та інфрачервоному діапазонах, а пересувний пента-відбивач адаптує пристрій до різних конфігурацій кулемета.

Оптична схема блока коліматора зображена на рис. 2.4.

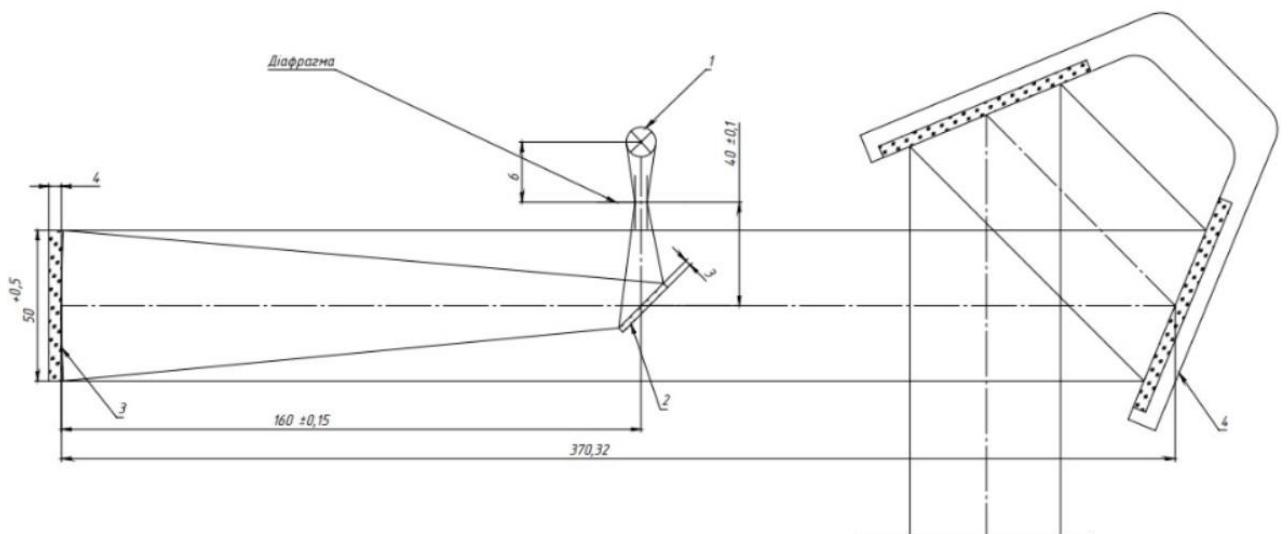


Рис. 2.4. Оптична схема блока коліматора

На рис. 2.4 показано: джерело випромінювання -1; осьове дзеркало коліматора -2; об'єктив коліматора -3; пента-відбивач -4.

Технічні вимоги:

1. Вихідна зіниця – 50 мм.
2. Робочий спектральний діапазон – 380...750 нм.
3. Діаметр діафрагми – 70,6 мкм.
4. Відносний отвір – 1:4.
5. Кардинальні параметри в табл.3 наведені для лінії d 588 нм.

Основні оптичні характеристики та розрахункові дані наведено в табл. 2.1 і табл. 2.2.

Таблиця 2.1

Номер позицій деталей	O_1	O_2	Товщина по осі
2	14,367	-	-
3	50	-	-
4	70,7	59,4	4

Таблиця 2.2

Номери складальної одиниці схеми	Назва складальної одиниці схеми	f'	S'_F	S''_F
1-3	Коліматор	200	199,94	-199,94

Оптична схема описує шлях світлового потоку через оптичні елементи пристрою, деталізуючи їхні характеристики та функції у формуванні зображення для пристрілювання у видимому діапазоні (380–750 нм). Використання видимого діапазону обумовлено вищою роздільною здатністю матриць, таких як Full HD, порівняно з HD-матрицями інфрачервоного діапазону, які мають нижчу роздільну здатність і вищу вартість. Процес розпочинається з джерела випромінювання, яке генерує світло в діапазоні 380–750 нм, підсвічуючи діафрагму з діаметром 70,6 мкм.

Діафрагма формує пучок променів, яке через плоске осьове дзеркало спрямовується на дзеркальний об'єктив коліматора. Об'єктив коліматора, із фокусною відстанню 200 мм створює паралельний пучок променів із діаметром 50 мм. Цей пучок надходить до першого пента-відбивача, який змінює його напрям на 90 градусів. Другий пента-відбивач, спрямовує пучок у вхідну зіницю прицільної системи. Об'єктив прицільної системи, із вхідною зіницею не більше 50 мм, фокусує зображення діафрагми на фотоприймальному пристрої, де воно відображається разом із прицільною маркою для порівняння оператором.

Взаємодія елементів. Світловий потік проходить від джерела випромінювання через діафрагму, осьове дзеркало, об'єктив коліматора, пента-відбивачі та об'єктив прицільної системи, формуючи зображення діафрагми на фотоприймальному пристрої. Дзеркальна оптика забезпечує передачу світла у видимому діапазоні з мінімальними втратами. Для усунення паралаксу, спричиненого можливим розфокусуванням діафрагми, застосовується юстування із зоровою трубою та пента-відбивачем при цьому діафрагма встановлюється у фокальну площину об'єктива коліматора. Похибки базування пента-відбивачів, які можуть викликати поворот зображення, компенсуються автоколімаційним методом із використанням гоніометра та дзеркального покриття на гранях відбивачів. За специфічних умов, замінивши джерело випромінювання з видимого діапазону на інфрачервоний, а також скориставшись тепловізійним каналом конструкція може бути адаптована для роботи в інфрачервоному діапазоні.

2.2 Габаритний розрахунок оптичної системи коліматора

Габаритний розрахунок оптичної системи коліматора є важливим етапом дипломного проектування, оскільки він дає змогу визначити її основні характеристики та параметри. Отже, визначимо параметри оптичної системи.

Згідно з технічним завданням, для виконання габаритного розрахунку задано наступні вихідні дані:

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		35

- діаметр сферичного дзеркала – 50 мм ;
- фокусна відстань – 200 мм ;
- відстань до плоского дзеркала – 160 мм;
- діаметр пучка на виході – 50 мм.

2.2.1 Параметри коліматорного дзеркального об'єктива

Оптична схема коліматора представлена на рис. 2.4.

Визначимо параметри дзеркального коліматорного об'єктива.

Розрахуємо радіус кривизни дзеркала:

$$R = 2f, \quad (2.1)$$

де f – фокусна відстань коліматора, $f = 200$ мм;

$$R = 2 * 200\text{мм} = 400 \text{ мм.}$$

Товщина дзеркала вздовж осі, необхідна для його точного виготовлення та запобігання деформації під час обробки інструментом, залежить від його світлових (габаритних) розмірів, способу кріплення та, насамперед, від необхідної точності робочої поверхні.

Чим точніше має бути форма робочої поверхні дзеркала, тим воно має бути товще. Товсті дзеркала менше деформуються при виготовленні, закріпленні і експлуатації.

З конструктивних міркувань приймемо товщину дзеркала рівною одній десятій його світлового діаметра, тобто:

$$t = 0.1 \cdot D, \quad (2.2)$$

де t - товщина дзеркала, а D - його світловий діаметр;

$$t = 0.1 \cdot 50 \text{ мм} = 5 \text{ мм.}$$

Виходячи з практичних міркувань, я вважаю осьову товщину в 5 мм цілком прийнятною. При цьому товщина по краю дзеркала буде значно більшою. Для світлового діаметра в 50 мм, осьову товщину можна варіювати в межах 3-7 мм. Збільшення товщини понад цей діапазон призведе лише до зайвих витрат матеріалу та збільшення ваги деталі. Матеріал підкладки дзеркала латунь.

										Лист
										36
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ПО11.00001.000 ПЗ					

2.2.2 Габарити плоского дзеркала

Для визначення параметрів плоского дзеркала скористаємося рис. 2.5 та використаємо співвідношення для визначення максимального та мінімального діаметрів світлової плями на його поверхні [27].

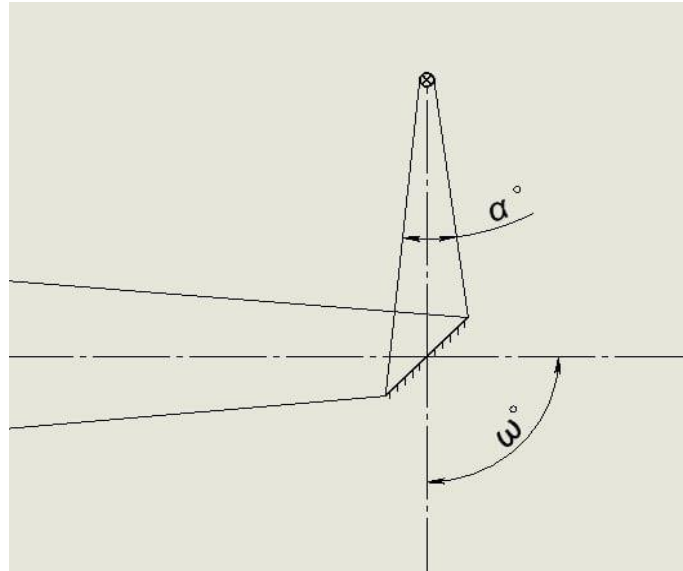


Рис. 2.5. Визначення параметрів плоского дзеркала

Для розрахунку використаємо задані в технічному завданні значення світлового діаметра сферичного дзеркала ($D=50$ мм) та фокусної відстані коліматора ($f=200$ мм).

Для розрахунку необхідно визначити α – половину кута сходження променів:

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{D}{2f} \right), \quad (2.3)$$

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{50}{2 \cdot 200} \right) = 2 \arctg 0,125 \approx 14^\circ.$$

Визначимо максимальний діаметр світлової плями на поверхні плоского дзеркала в оптичній системі коліматора [27]:

$$l_{\max} = L \cdot \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{\omega + \alpha}{2} \right)} + \frac{1}{\sin \left(\frac{\omega - \alpha}{2} \right)} \right), \quad (2.4)$$

де L - відстань від діафрагми до центра плоского дзеркала, $L = 40$ мм;

α – половина кута сходження променів; ω – кут повороту, $\omega = 90^\circ$;

$$l_{\max} = 40 * \sin \left(\frac{14}{2} \right) \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{90+14}{2} \right)} + \frac{1}{\sin \left(\frac{90-14}{2} \right)} \right) = 14,367 \text{ мм.}$$

Визначимо мінімальний діаметр світлової плями на плоскому дзеркалі в коліimatorній оптичній системі[27]:

$$l_{min} = l_{max} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\omega - \alpha}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{l_{max} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \alpha}{2}\right)}{L \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}}}, \quad (2.5)$$

$$l_{min} = 14,367 * \frac{\sin\left(\frac{90-14}{2}\right)}{\cos\left(\frac{14}{2}\right) \sqrt{\frac{14,367 * \sin\left(\frac{90-14}{2}\right)}{40 * \sin\left(\frac{14}{2}\right)}}} = 6.667 \text{ мм.}$$

Отже, $l_{max} \approx 14 \text{ мм}$; $l_{min} \approx 7 \text{ мм}$.

2.2.3 Розрахунок діаметра діафрагми коліатора

Для визначення діаметра діафрагми необхідно використати параметри габаритів монітора, об'єктива монітора та матриці.

Обрано наступні вихідні параметри:

- монітор DJI Smart Controller: 5.5" (139.7 мм діагональ) Full HD (1920 × 1080) IPS дисплей, вбудована ОС Android.
- об'єктив Yongnuo 17mm f/1.7M в телевізійній камері, який проектує зображення на матрицю [28].
- матриця Sony ICX445AQA CCD. Тип - CCD, 2/3" (~11 мм діагональ), активна область 8.8×6.6 мм, 3264×2448 (8 МП), піксель 3.45 мкм [29].
- фокусна відстань об'єктива коліатора 200 мм.

Відомо, що чутливість суміщення кола маленького діаметра з перехрестям прицілу складає 0,075 мм на моніторі.

Для розрахунку обчислимо електронне збільшення :

$$|\beta_{ел.}| = \frac{L_{мон.}}{L_{матр.}}, \quad (2.6)$$

де $\beta_{\text{ел.}}$ - електронне збільшення; $L_{\text{мон.}}$ - діагональ монітора; $L_{\text{матр.}}$ - діагональ матриці;

$$|\beta_{\text{ел.}}| = \frac{139,7\text{мм}}{11\text{мм}} = 12,7.$$

Тоді, з урахуванням електронного збільшення, утвореного камерою і монітором, знайдемо розмір зображення цілі в площині матриці:

$$D' = \frac{D''}{|\beta_{\text{ел.}}|}, \quad (2.7)$$

де D' - розмір зображення цілі на матриці; D'' - розмір зображення цілі на моніторі;

$$D' = \frac{0,075\text{ мм}}{12,7} = 0,0059\text{ мм} = 5,9\text{ мкм.}$$

Обчислимо збільшення системи коліматор- телевізійний об'єктив:

$$|\beta_{\text{опт.}}| = \frac{f_{\text{об.}}}{f_{\text{об.кол.}}}, \quad (2.8)$$

де $\beta_{\text{опт.}}$ - збільшення діаметра системи діафрагми; $f_{\text{об.}}$ - фокусна відстань об'єктива телевізійної системи; $f_{\text{об.кол.}}$ - фокусна відстань об'єктива коліматора;

$$|\beta_{\text{опт.}}| = \frac{17\text{ мм}}{200\text{ мм}} = 0,085.$$

Визначимо розмір діафрагми:

$$|\beta_{\text{опт.}}| = \frac{D'}{D}, \quad (2.9)$$

$$\text{звідси } D = \frac{D'}{|\beta_{\text{опт.}}|}, \quad (2.10)$$

де D' - розмір зображення цілі на матриці, D - діаметр діафрагми;

$$D = \frac{5,9\text{ мкм}}{0,085} = 69,4\text{ мкм.}$$

Отже, діаметр діафрагми приблизно 70 мкм.

2.2.4 Визначення кута поля зору

Розрахуємо кутове поле зору коліматора:

$$\omega = 2\arctg\left(\frac{L_{\text{матр.}}}{2f_{\text{об.}}}\right), \quad (2.11)$$

де ω - поле зору прицільного зору; $L_{\text{матр.}}$ - діагональ матриці; $f_{\text{об.}}$ - фокусна відстань об'єктива телевізійної системи;

$$\omega = 2\arctg\left(\frac{11\text{ мм}}{2 \cdot 17\text{ мм}}\right) = 2\arctg 0,32 = 36^\circ.$$

2.2.5 Габарити пента-відбивача

Для визначення параметрів пента-відбивача використаємо рис. 2.6 та застосуємо співвідношення для обчислення максимального і мінімального світлових діаметрів пента-відбивачів.

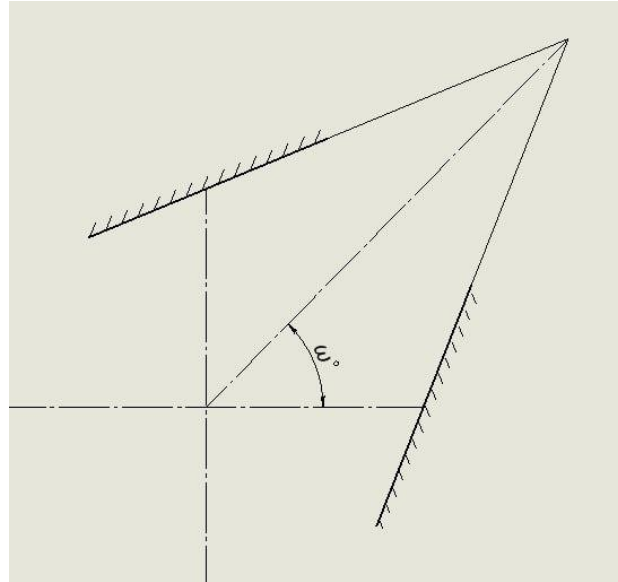


Рис. 2.6. Розрахунок габаритів пента-відбивача

Для розрахунку використаємо значення діаметра пучка на виході, що становить 50 мм згідно з технічним завданням.

Визначимо максимальний світловий діаметр пента-відбивачів [27]:

$$l_{\max} = \frac{D}{\sin \omega}, \quad (2.12)$$

де D - діаметр пучка на виході; ω – кут нахилу системи пента-відбивача; $\omega = 45^\circ$;

$$l_{\max} = \frac{50\text{мм}}{\sin 45^\circ} = \frac{50\text{мм}}{0,7071} = 70,7 \text{ мм.}$$

Визначимо мінімальний світловий діаметр пента-відбивачів[27]:

$$l_{\min} = D, \quad (2.13)$$

$$l_{\min} = 50 \text{ мм.}$$

Отже, $l_{\max} = 70,7 \text{ мм}$; $l_{\min} = 50 \text{ мм}$.

2.3 Енергетичний розрахунок

Енергетичні розрахунки допомагають оцінити ефективність оптичної системи. Завдяки їм можна виявити проблеми з розподілом світлової енергії, визначити зони втрат і рівень вихідного сигналу.

2.3.1 Визначення втрат випромінювання в оптичній системі блока коліматора

В оптичній системі основні втрати світла зумовлені вирізанням діафрагмою частини світлового потоку від світлодіода, дифракцією на діафрагмі, через що кут відхилення променів дещо перевищує світлову апертуру коліматора, наявністю вторинного дзеркала на шляху променя та формуванням коліматором пучка світла, діаметр якого більший за об'єктив телевізійної камери.

Для визначення втрат випромінювання в оптичній системі блока коліматора використаємо наступні вихідні дані:

1. Джерело випромінювання: світлодіод LL-504PGC1E-G5-1C, потужність якого $P_0 = 200$ мВт, довжина хвилі $\lambda = 530$ нм, кут розходження випромінювання $\alpha = 20^\circ$.
2. Матричний приймач Sony ICX445AQA CCD. Тип – CCD, розмір матриці 2/3» (~11 мм діагональ), активна область 8.8×6.6 мм, кількість пікселів 3264×2448 (8 МП), розмір пікселя 3.45×3.45 мкм, спектральний діапазон 400-700нм, чутливість матриці $0.05 \text{лкс} = 7.3 \cdot 10^{-9} \text{Вт/см}^2$ при $\lambda = 530 \text{нм}$.
3. Відстань від джерела до діафрагми: $d = 6$ мм
4. Діаметр отвору діафрагми: $d_o = 69,4$ мкм.
5. Параметри оптичної системи коліматора: фокусна відстань $f' = 200$ мм, діаметр дзеркального об'єктива $D = 50$ мм.

Для орієнтовного розрахунку припустимо, що джерело випромінювання є точковим, а потужність випромінювання в межах індикатриси випромінювання є сталою. На основі цих даних визначимо діаметр світлової плями в площині діафрагми за відповідною формулою :

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$D_s = 2d \cdot \operatorname{tg} \alpha/2, \quad (2.14)$$

$$D_s = 2 * 6\text{мм} * \operatorname{tg} \frac{20}{2} = 2,12 \text{ мм}.$$

Обчислимо площу світлової плями на поверхні діафрагми:

$$S_s = \pi \frac{D_s^2}{4}, \quad (2.15)$$

$$S_s = 3.14 * \frac{(2,12 \text{ мм})^2}{4} = 3,53 \text{ мм}^2.$$

Знайдемо площу отвору в діафрагмі:

$$S_d = \pi \frac{d_o^2}{4}, \quad (2.16)$$

$$S_d = 3.14 * \frac{(0,0694 \text{ мм})^2}{4} = 0,00378 \text{ мм}^2.$$

Для розрахунку коефіцієнта він'єтування світлового потоку джерела використаємо формулу:

$$\eta = \frac{D_s^2}{d_o^2}, \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{(2,12 \text{ мм})^2}{(0,0694 \text{ мм})^2} = \frac{4,4944}{0,004816} = 933,3.$$

Визначимо потужність випромінювання на виході діафрагми:

$$P_1 = P_0/\eta, \quad (2.18)$$

$$P_1 = \frac{200 \text{ мВт}}{933,3} = 0,214 \text{ мВт} = 214 \text{ мкВт}.$$

Для знаходження кута, під яким буде спостерігатись дифракційна картина на діафрагмі нульового порядку скористаємося формулою:

$$\varphi = \operatorname{arcsin} \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2 \cdot d_o}, \quad (2.19)$$

де $k=0$ – порядок дифракційного максимуму,

$$\varphi = \operatorname{arcsin} \frac{(2 \cdot 11 + 1) \cdot 0,53 \text{ мкм}}{2 \cdot 69,4 \text{ мкм}} = \operatorname{arcsin}(0,00382) = 0,219^\circ.$$

Для визначення кута, що відповідає числовій апертурі коліматора використаємо формулу:

$$\beta = \frac{D}{2f'}, \quad (2.20)$$

$$\beta = \frac{50 \text{ мм}}{2 \cdot 200 \text{ мм}} = 0,125 \text{ рад} = 7,16^\circ.$$

Отже, $\varphi = 0,219^\circ$, $\beta = 7,16^\circ$.

Оскільки $\varphi < \beta$, весь дифракційний максимум нульового порядку потрапляє в межі числової апертури коліматора, тож втрати через неузгодження кутів мінімальні. Якщо прийняти до уваги те, що в дифракційному розподілі енергії на точковій діафрагмі в нульовому порядку зосереджено 80% всієї енергії, а також те, що частина енергії втрачається внаслідок неузгодження кутів φ та β , приймемо потужність випромінювання на поверхні сферичного дзеркала рівною 60% від всієї потужності випромінювання, що проходить точкову діафрагму.

Скориставшись попередніми даними, отримаємо значення потужності випромінювання на поверхні сферичного дзеркала:

$$P_2 = 0,6 * P_1, \quad (2.21)$$

$$P_2 = 0,6 * 214 \text{ мкВт} = 128,4 \text{ мкВт} = 128400 \text{ нВт}.$$

2.3.2 Оцінка рівня сигналу з матричного фотоприймача.

Визначимо він'єтування випромінювання відбитого сферичним дзеркалом конструкцією вузла плоского дзеркала. Для цього порівняємо площини поперечного перетину світлового пучка, відбитого сферичним дзеркалом, і конструкції вузла плоского дзеркала.

Світловий пучок після проходження діафрагми (на відстані $L = 40$ мм) падає на плоске дзеркало діаметром 13 мм. Для обчислення втрат на плоскому дзеркалі, визначимо діаметр пучка з урахуванням його розширення після проходження діафрагми:

$$D_{\text{пучка}} = D_s + 2 * L * tg\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (2.22)$$

$$D_{\text{пучка}} = 2,12 \text{ мм} + 2 * 40 \text{ мм} * tg\left(\frac{20}{2}\right) = 14,11 \text{ мм}.$$

Обчислимо площу пучка за формулою:

$$S_{\text{пучка}} = \pi * \frac{D_{\text{пучка}}^2}{4}, \quad (2.23)$$

$$S_{\text{пучка}} = 3,14 * \frac{(14,11 \text{ мм})^2}{4} = 156,4 \text{ мм}^2.$$

Розрахуємо площу плоского дзеркала :

$$S_{\text{дзеркала}} = 3,14 * \frac{(13 \text{ мм})^2}{4} = 132,73 \text{ мм}^2.$$

Знайдемо частку потоку на плоскому дзеркалі:

$$\eta_{\text{дзеркало}} = \frac{S_{\text{дзеркала}}}{S_{\text{пучка}}}, \quad (2.24)$$

$$\eta_{\text{дзеркало}} = \frac{132,73 \text{ мм}^2}{156,4 \text{ мм}^2} = 0,848 = 84,8 \text{ \%}.$$

Визначимо втрати світлового потоку на відбитті від поверхні плоского дзеркала. Типовий коефіцієнт відбиття дзеркала ~ 0.9 (втрати $\sim 10\%$). Потужність випромінювання після плоского дзеркала:

$$P_3 = P_2 * \eta_{\text{дзеркало}} * 0,9, \quad (2.25)$$

$$P_3 = 214 \text{ мкВт} * 0.848 * 0.9 = 163,4 \text{ мкВт}.$$

Обчислимо втрати на сферичному дзеркалі. Світловий пучок, що відбивається від плоского дзеркала, на відстані 160 мм досягає сферичного дзеркала. Визначимо діаметр цього пучка, враховуючи його розширення:

$$D_{\text{пучка}} = D_{\text{дзеркала}} + 2 * L * \text{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right), \quad (2.26)$$

$$D_{\text{пучка}} = 13 \text{ мм} + 2 * 160 \text{ мм} * \text{tg} \left(\frac{20}{2} \right) = 69,42 \text{ мм}.$$

Світловий пучок обмежується апертурою сферичного дзеркала. Розрахуємо площу цього пучка:

$$S_{\text{пучка}} = \pi * \frac{(50 \text{ мм})^2}{4} = 1963,5 \text{ мм}^2.$$

Обчислимо втрати світлового потоку на відбитті від поверхні сферичного дзеркала:

$$P_4 = P_3 * 0,9, \quad (2.27)$$

$$P_4 = 163,4 \text{ мкВт} * 0,9 = 147,1 \text{ мкВт}.$$

Знайдемо потужність сформованого паралельного пучка, якщо через дифракційні ефекти та апертуру проходить лише 60% від загальної потужності вихідного випромінювання.

$$P_5 = P_4 * 0,6, \quad (2.28)$$

$$P_5 = 147.1 \text{ мкВт} * 0,6 = 88.26 \text{ мкВт}.$$

Визначимо сигнал на виході матричного приймача та рівень сигналу на пікселі.

Активна область, що відповідає зображенню точкової діафрагми коліматора, зазначеної у пункті 2.2.3, має діаметр $D \approx 6 \text{ мкм}$, а відповідна площа цієї активної області становить:

$$S_{\text{плями}} = \pi \frac{D^2}{4}, \quad (2.29)$$

$$S_{\text{плями}} = 3,14 * \frac{(6 \text{ мкм})^2}{4} = 28,3 \text{ мкм}^2.$$

Площа одного пікселя складає:

$$S_{\text{пікселя}} = 3,45 * 3,45 = 1,19025 * 10^{-5} \text{ мм}^2 = 11,9 \text{ мкм}^2.$$

Обчислимо відношення площі світлової плями до площі одного пікселя:

$$\frac{S_{\text{плями}}}{S_{\text{пікселя}}} = \frac{28,3 \text{ мкм}^2}{11,9 \text{ мкм}^2} = 2,4.$$

З огляду на те, що потужність випромінювання, сконцентрована в одній світловій плямі, яка відповідає розміру діафрагми на поверхні матричного приймача, становить $P_5 = 88,26 \text{ мкВт}$, розрахуємо потужність, що припадає на один піксель:

$$P_{\text{піксель}} = \frac{P_5}{2,4}, \quad (2.30)$$

$$P_{\text{піксель}} = \frac{88,26 \text{ мкВт}}{2,4} = 36,8 \text{ мкВт} = 3,68 * 10^{-2} \text{ мВт}.$$

Оцінимо рівень сигналу з матричного фотоприймача.

Враховуючи чутливість матриці $7,3 * 10^{-9} \text{Вт/см}^2 = 7,3 * 10^{-7} \text{мВт/мм}^2$ та площу пікселя, розрахуємо мінімальну потужність для детектування на пікселі:
 $P_{\text{мін.піксель}} = 7,3 * 10^{-7} \text{мВт/мм}^2 * 1,19025 * 10^{-5} \text{мм}^2 = 8,69 * 10^{-12} \text{мВт}.$

Порогова чутливість матричного приймача становить $8,69 * 10^{-12} \text{мВт}$, тоді як потужність сигналу на один піксель, з урахуванням втрат, визначених у пункті 2.3, дорівнює $3,68 * 10^{-2} \text{мВт}$. Отже, потужність сигналу на пікселі значно (на кілька порядків) перевищує поріг чутливості. Це забезпечує надійне виявлення сигналу з високим співвідношенням сигнал/шум і значним запасом чутливості. Сигнал залишається стабільним і майже не піддається впливу шумів, що є критично важливим для точних вимірювань. Таким чином, система функціонує ефективно.

Проведемо оцінку концентрації енергії.

Розмір п'ятна: $0,0694 \text{мм} * \frac{200 \text{мм}}{6 \text{мм}} = 2,31 \text{мм}$ (~670 пікселів).

Для 5x5 пікселів: $P_{\text{п'ятна}} = 25 * 3,68 * 10^{-2} \text{мВт} = 0,92 \text{мВт}$, що значно перевищує поріг ($25 * 8,69 * 10^{-12} \text{мВт} \approx 2,17 * 10^{-10} \text{мВт}$).

Потужність, зосереджена в межах світлової плями, значно перевищує пороговий рівень чутливості для групи пікселів, що гарантує надійну, стабільну та точну реєстрацію сигналу. Завдяки малій площі засвічення на матричному приймачі навіть незначна потужність забезпечує чіткий сигнал, тобто, енергія концентрується у компактній світловій плямі, яка відповідає кількості пікселів, на які в остаточному зображенні проєктується зображення отвору діафрагми коліматора.

Висновки до розділу 2

У другому розділі визначені складові та конструктивні параметри оптичної схеми коліматора за схемою Ньютона, яка обґрунтована в першому розділі: джерело випромінювання — світлодіод LL-504PGC1E-G5-1C, відстань від джерела до площини діафрагми — 6 мм, від площини діафрагми до осьового дзеркала — 40 мм, від осьового дзеркала до сферичного дзеркала — 160 мм, від сферичного дзеркала до пента-відбивача — 370 мм.

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		46

На основі виконаних розрахунків визначено світловий діаметр осьового дзеркала, який прийнято за максимальним значенням і становить приблизно 13 мм. Світловий діаметр на пента-призмі визначено за середнім значенням і становить 55 мм.

Відповідно до параметрів коліматора та фотоприймального пристрою, наведених у другому розділі, визначено діаметр точкової діафрагми, який становить приблизно 70 мкм.

На основі проведеного енергетичного розрахунку можна зробити висновок, що основні втрати випромінювання в системі спричинені він'єтуванням, яке виникає: на точковій діафрагмі; на конструкції осьового дзеркала; внаслідок неузгодженості апертур об'єктива коліматора та об'єктива телевізійної системи прицілювання.

Потужність випромінювання, сконцентрована в одній світловій плямі, що відповідає розміру діафрагми на поверхні матричного приймача, становить 88,26 мкВт, тоді як потужність на одному пікселі дорівнює 37 мкВт. Порогова чутливість матричного приймача складає $8,7 * 10^{-12}$ мВт, а потужність сигналу на пікселі, з урахуванням втрат, становить $3,7 * 10^{-2}$ мВт. Таким чином, потужність сигналу на пікселі значно (на кілька порядків) перевищує порогову чутливість, що забезпечує надійне виявлення сигналу з високим співвідношенням сигнал/шум і значним запасом чутливості. Сигнал залишається стабільним, практично не зазнаючи впливу шумів, що є критично важливим для точних вимірювань. Система демонструє високу ефективність роботи.

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		47

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ

3.1 Вимоги до точності базування коліматора

Точність базування коліматора в оптико-механічній системі "холодного" пристрілювання є ключовим фактором для правильного вирівнювання осі ствола бойового робота (БР) із віссю прицільної системи. В роботі [9] зазначається, що прилади "холодного" пристрілювання повинні мати мінімальну власну похибку, яка не перевищує середньоквадратичного розсіювання боєприпасів, заданого на рівні 4 мрад. Отже, кутова похибка базування коліматора не повинна перевищувати 0.004 радіан (4 мрад), щоб гарантувати точне позиціонування променів, сформованого через діафрагму, відносно прицільної марки на відстані до 100 метрів. Перевірка цієї вимоги здійснюється за допомогою автоколімаційної зорової труби, що дозволяє вимірювати кут відхилення променів коліматора від осі ствола з точністю до 0.5 мрад.

Оскільки пучок променів формується діафрагмою, точність її позиціонування відносно фокальної площини об'єктива коліматора стає вирішальною для уникнення паралаксу. Паралакс виникає через розфокусування, коли пучок променів, обмежений діафрагмою, стає розбіжним або збіжним на виході коліматора. Щоб цього уникнути, відхилення площини діафрагми від фокальної площини об'єктива коліматора не повинно перевищувати глибину різкості об'єктива, яка залежить від його параметрів. Для об'єктива з відносною апертурою $F/4$ і довжиною хвилі світла 0.55 мкм (видимий діапазон) глибина різкості становить приблизно 4.4 мкм, тому допустиме відхилення діафрагми має бути в межах ± 2.2 мкм [33]. Це забезпечить, що кутове відхилення променю через розфокусування не перевищить 0.001 радіан (1 мрад) на відстані до 100 метрів, що є критичним для пристрілювання.

Для компенсації розфокусування використовується юстування за допомогою пента-відбивача та зорової труби. Пента-відбивач переміщується перпендикулярно до осі об'єктива, а зміщення зображення, сформованого діафрагмою, вимірюється через зорову трубу. Зміщення об'єктива або діафрагми коліматора вздовж осі для

										Лист
										48
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ПО11.00001.000 ПЗ					

отримання паралельного пучка визначається за формулою $\Delta x = \frac{f_c * Y}{f_t}$, де f_c -фокусна відстань коліматор, f_t – фокусна відстань зорової труби, а Y – лінійне зміщення зображення в площині сітки труби. Точність такого переміщення Δx має бути не нижчою за 10 мкм, щоб гарантувати чіткість контуру променя на фотоприймальному пристрої. Перевірка проводиться через зорову трубу із заданою шкалою, що дозволяє визначити зміщення з точністю до 5 мкм [33].

Кутове базування коліматора відносно осі ствола має значний вплив на точність пристрілювання, особливо при зміні відстані між стволом і віссю прицілу ($L = 100 - 400$ мм).

Згідно з формулою [31] $D \geq \frac{L}{[\delta L]}$ $[\delta L]$, де $[\delta L] = 4$ мрад відстань до екрану має бути не меншою за 25 метрів для $L = 100$ мм. Щоб забезпечити допустиму похибку, кутове відхилення осі коліматора від осі ствола не повинно перевищувати 0.002 радіан (2 мрад). При зміні відстані L у діапазоні 100-400 мм кутова похибка має залишатися стабільною з максимальною варіацією ± 0.001 радіан (1 мрад), що досягається завдяки переміщенню другого пента-відбивача.

Для досягнення такої точності кутового вирівнювання використовується система з двома пента-відбивачами, які дозволяють компенсувати зміщення осі прицілу відносно осі ствола. Перший пента-відбивач є фіксованим і забезпечує базове відхилення пучка на 90° , тоді як другий пента-відбивач переміщується вздовж направляючої для адаптації до різних значень L .

Стабільність базування коліматора в часі та при зміні зовнішніх умов є критично важливою для роботи в польових умовах. Зміни температури, вологості чи вібрації не повинні суттєво впливати на точність, тому зміщення осі коліматора через термічні деформації або вібрацію не повинно перевищувати 10 мкм у лінійному вимірі або 0.001 радіан (1 мрад) у кутовому. Для цього матеріали направляючої та корпусу коліматора мають мати коефіцієнт термічного розширення не більше $10^{-5} K^{-1}$. Перевірка стабільності проводиться шляхом тестування системи при температурах від $-20^\circ C$ до $+50^\circ C$ та вібраціях із амплітудою до 5g, а зміщення осі вимірюється за допомогою лазерного інтерферометра з точністю до 1 мкм [33].

									Лист
									49
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ПО11.00001.000 ПЗ				

Точність базування коліматора також залежить від його взаємодії з пента-відбивачами, які змінюють орієнтацію променя, сформованого діафрагмою. Похибка повороту пента-відбивача відносно осі коліматора не повинна перевищувати 0.005 радіан (5 мрад), щоб уникнути розфокусування контуру променя на краях поля зору. Другий пента-відбивач, який переміщується для адаптації до різних відстаней L , має бути позиціонований із точністю до 50 мкм. Компенсація похибок базування пента-відбивачів здійснюється за допомогою гоніометра ГС-5 із нанесенням дзеркального покриття на бічні грані пента-відбивача (кут між гранями $220^{\circ}30'$). Перевірка виконується шляхом вимірювання кута відбитого променя та зміщення контуру променя за допомогою автоколімаційної труби.

Паралакс, викликаний зміщенням фотоприймача або ока оператора відносно осі пристрілювання, впливає на точність. Згідно з формулою $\rho = t * \tan(\alpha)$, де t — поперечне зміщення (наприклад, 10 мм), а α кут паралакса, кут α не повинен перевищувати 0.002 радіан (2 мрад). Це забезпечить максимальну похибку відліку $\rho \leq 0.002$ мм на фотоприймачі. Компенсація паралаксу виконується шляхом переміщення блока освітлювача разом із діафрагмою та вузла плоского дзеркала вздовж оптичної осі коліматора по направляючій, що передбачена конструкцією коліматора (див. кресл. ДП.ПО11.01.01.00.00 СБ), або об'єктива коліматора вздовж осі з точністю до 5 мкм, а перевірка проводиться шляхом штучного зміщення фотоприймача на 10 мм і вимірювання зміщення ρ за допомогою мікрометра.

Оскільки коліматор кріпиться до направляючої, яка вставляється в ствол, точність її установки є важливою. Діаметр направляючої має відповідати внутрішньому діаметру ствола з допуском ± 0.01 мм, щоб уникнути механічних зсувів, а аксіальне зміщення направляючої в стволі не повинно перевищувати 20 мкм. Це перевіряється за допомогою нутроміра та лазерного дальноміра з точністю до 1 мкм [33].

Точність базування коліматора має бути мінімально залежною від кваліфікації оператора. Для перевірки цієї вимоги система тестується операторами з різним рівнем досвіду, а результати порівнюються, щоб оцінити варіацію точності.

										Лист
										50
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ПО11.00001.000 ПЗ					

3.2 Опис конструкції коліматора

Конструкція блоку коліматора для автоматизованої системи «холодного» пристрілювання розроблена на основі ньютонівської дзеркальної схеми, що забезпечує формування стабільного колімованого пучка у видимому та дальньому інфрачервоному діапазонах для юстування прицілів телевізійних і тепловізійних каналів без використання бойових пострілів [31, 32]. Конструкція мінімізує паралакс між оптичною та ствольною осями, забезпечуючи високу точність і компактність для інтеграції в дистанційно керовані бойові модулі.

Головним завданням проєкту була розробка та втілення конструкторських рішень для розробленої оптичної схеми (рис. 2.4).

Конструкція приладу (див. кресл. ДП.ПО11.01.01.00.00 СБ) складається з чотирьох основних вузлів: вузол об'єктива коліматора (поз. 1), вузол коліматора (поз. 2), вузол освітлювача (поз. 3) та блок пента-відбивача.

Нижче наведено детальний опис основних компонентів конструкції та їх функціонального призначення.

У складі оптичної системи ключовими елементами є джерело випромінювання та діафрагма, які входять до вузла освітлювача (див. кресл. ДП.ПО11.01.01.02.00 СБ).

Джерело світла (рис.3.1) . Як джерело світла використовується світлодіод (LED), що функціонує як умовно точкове джерело.

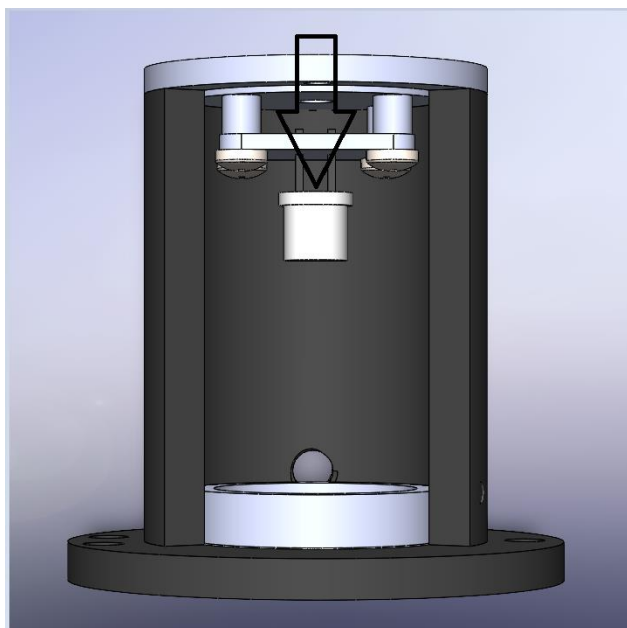


Рис. 3.1. Джерело світла у вузлі освітлювача

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		51

Світлодіод працює у видимому та інфрачервоному діапазонах, що дозволяє юстувати як телевізійні, так і тепловізійні приціли. Світлодіод розташований таким чином, щоб освітлювати діафрагму, створюючи рівномірний світловий потік.

До кришки освітлювача (поз. 1) кріпиться плата, на яку попередньо припаяний світлодіод.

Діафрагма (рис. 3.2). Другий оптичний елемент — це діафрагма (поз. 4), виготовлена з дуже тонкої алюмінієвої пластинки з отвором, створеним лазерним випалюванням. Ця діафрагма закладається у корпус (поз. 2), заздалегідь зверху накривається кільцем (поз. 3), і це кільце притискається гвинтами (поз.7).

Діафрагма з діаметром 70,6 мкм розташована у фокусі об'єктива коліматора (фокусна відстань 200 мм). Вона обмежує світловий потік від світлодіода, формуючи чітке зображення, яке імітує віддалену ціль. Точний розмір діафрагми забезпечує необхідну роздільну здатність і якість колімованого пучка.

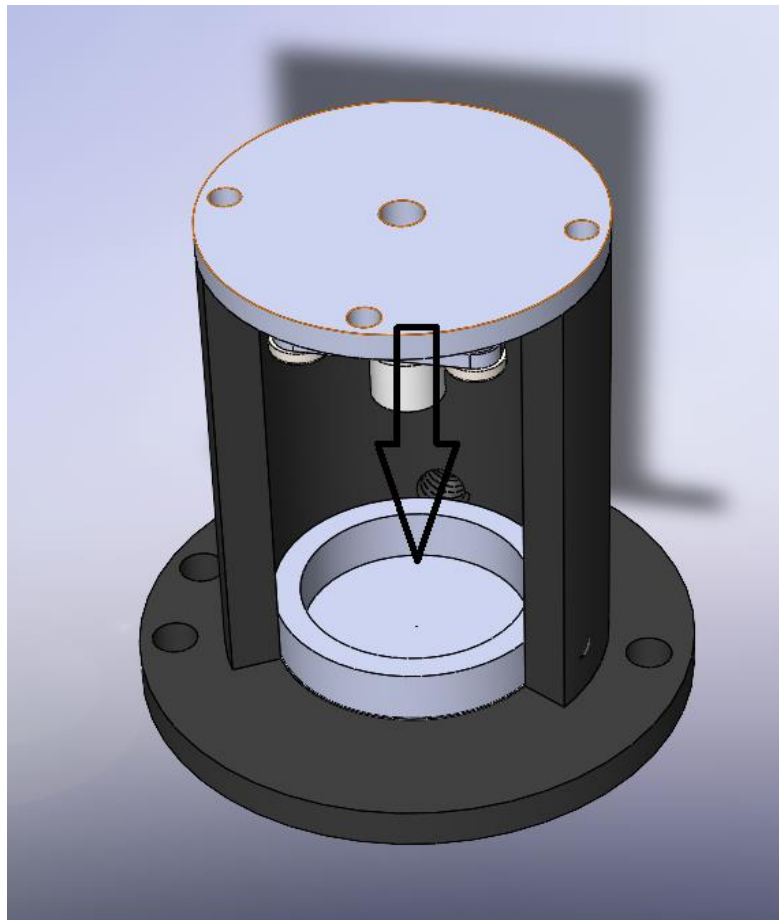


Рис. 3.2. Діафрагма у вузлі освітлювача

У вузлі коліматора (див. кресл. ДП.ПО11.01.01.01.00 СБ) передбачено юстування кількох оптичних елементів. Зокрема, першим є джерело випромінювання (поз. 1), яке знаходиться у вузлі освітлювача. Цей вузол має змогу рухатись вздовж пазів, які зміщують його вздовж горизонтальної оптичної вісі.

Другим елементом є **плоске осьове дзеркало** (рис. 3.3), розміщене в оправі (поз. 2), яка кріпиться до корпусу коліматора (поз. 3) за допомогою балок (поз. 4). Балки рухаються вздовж відповідних пазів, що дає можливість переміщати осьове дзеркало вздовж оптичної вісі. Крім того, передбачено регулювання кута нахилу оправы за допомогою гвинта (поз. 7). Оправа та гвинт з'єднані між собою пружиною (поз. 11).

Плоске дзеркало розташоване на відстані 160 мм від сферичного дзеркала. Воно перенаправляє світловий потік від діафрагми до сферичного дзеркала, яке виступає в ролі об'єктива коліматора. Дзеркало виготовлене з оптичного матеріалу з високим коефіцієнтом відбиття, що мінімізує втрати світлової енергії.

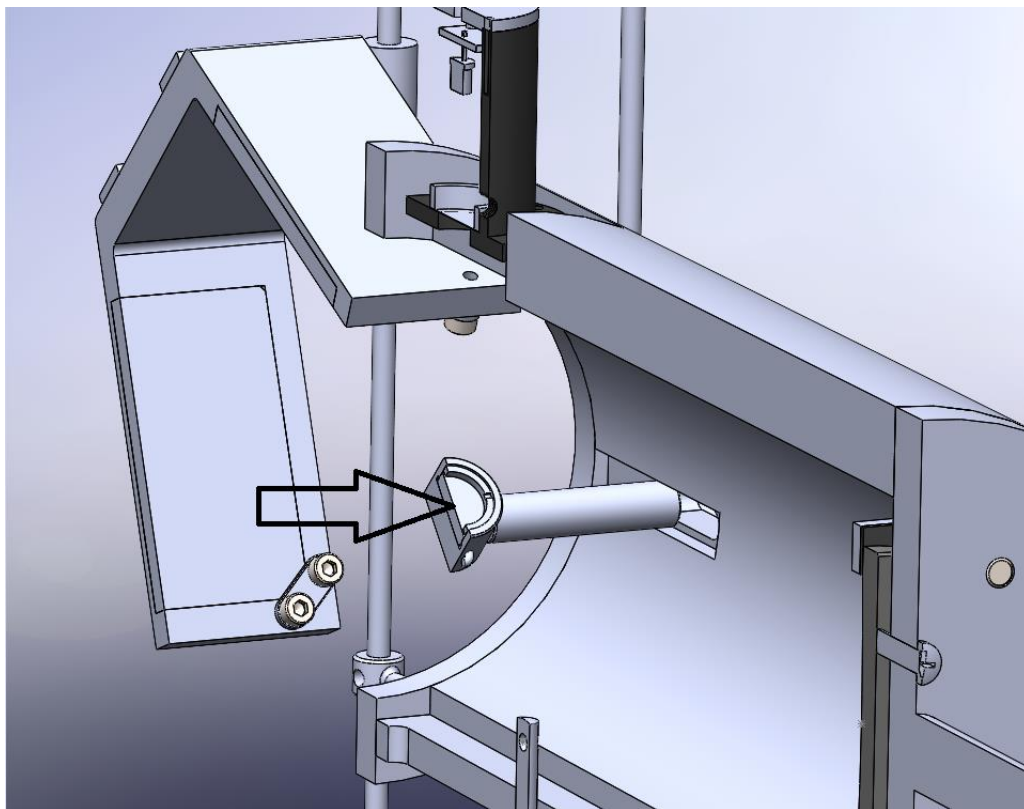


Рис. 3.3. Осьове дзеркало коліматора

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Корпус блоку коліматора (рис. 3.4). Корпус (поз. 3) виготовлений з легкого та міцного алюмінієвого сплаву, що забезпечує захист оптичних компонентів від зовнішніх впливів (пил, волога, механічні пошкодження). Конструкція корпусу передбачає точне позиціонування світлодіода, діафрагми, плоского та сферичного дзеркал, а також можливість їх регулювання для юстування. Корпус оснащений кріпленнями для інтеграції з бойовими модулями.

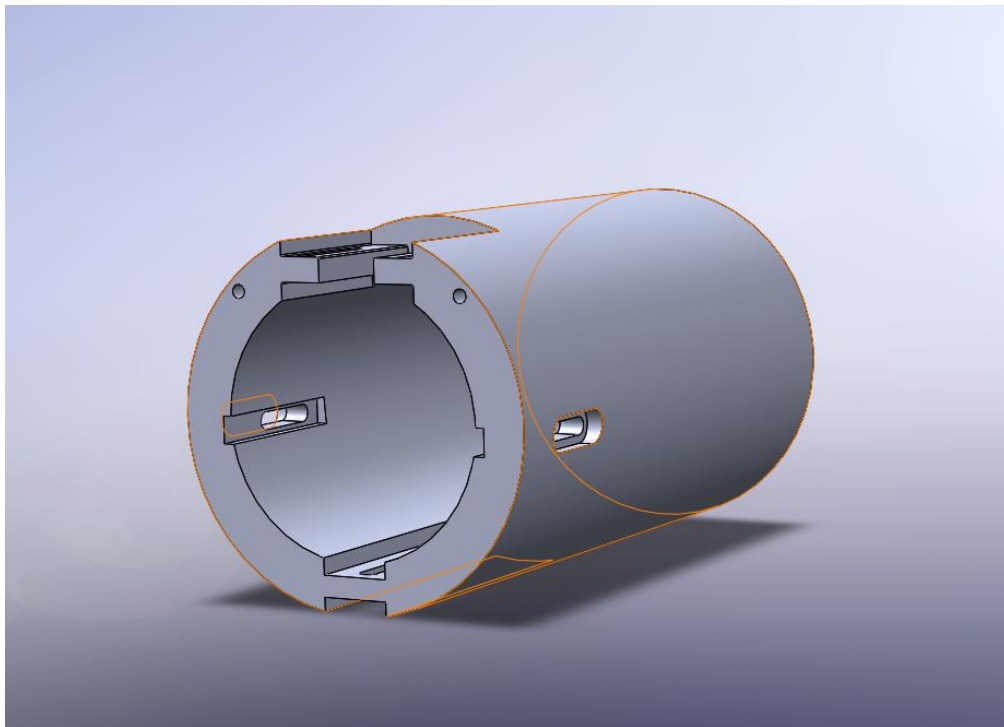


Рис. 3.4. Корпус коліматора

Сферичне дзеркало (об'єктив коліматора) (рис. 3.5) . Об'єктивом коліматора виступає сферичне дзеркало (див. кресл. ДП.ПО11.01.01.04.02) з діаметром 50 мм, радіусом кривизни 400 мм і фокусною відстанню 200 мм, що формує колімований пучок. Воно отримує світло від плоского дзеркала і створює паралельний пучок із діаметром 50 мм на виході. Високоякісне нікелеве покриття дзеркала забезпечує ефективне відбиття у видимому та інфрачервоному спектрах.

Сферичне дзеркало (поз. 3), яке входить до вузла кріплення об'єктива коліматора (див. кресл. ДП.ПО11.01.01.04.00 СБ) кріпиться по периметру самого дзеркала за чотири гвинти (поз. 6) і притискається планками (поз. 2) через прокладку(поз. 4). А в задній частині дзеркала є три юстувальні гвинти (поз. 5).

										Лист
										54
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

ДП.ПО11.00001.000 ПЗ

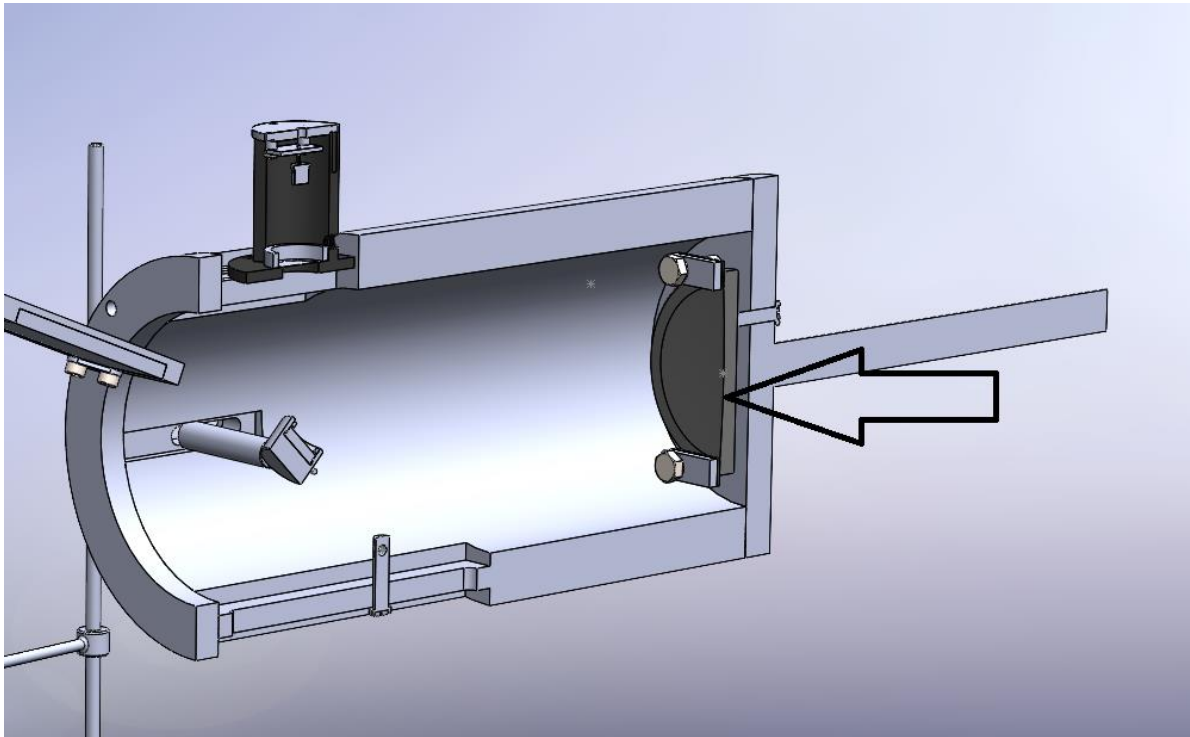


Рис. 3.5. Об'єktiv коліматора

Схема роботи блоку коліматора виглядає наступним чином: світлодіод освітлює діафрагму діаметром 70,6 мкм, розташовану у фокусі сферичного дзеркала (об'єктива коліматора). Світловий потік від діафрагми спрямовується на плоске осьове дзеркало, яке перенаправляє його до сферичного дзеркала. Сферичне дзеркало формує колімований пучок діаметром 50 мм, що виходить із системи та імітує віддалену ціль для прицільних систем. Така схема забезпечує точне вирівнювання оптичної осі прицілу зі ствольною віссю без необхідності бойового пострілу.

Пента-відбивач (див. кресл. ДП.ПО11.01.01.03.00 СБ), який складається з двох латунієвих дзеркал із нікелевим покриттям (поз. 1), змінює оптичну вісь на 90 градусів. Дзеркала кріпляться в оправі та притискаються двома пластинками по кутах (поз. 3). Юстування пента-відбивача здійснюється шляхом його пересування вздовж оптичної осі по направляючих (поз. 6, кресл. ДП.ПО11.01.01.00.00 СБ).

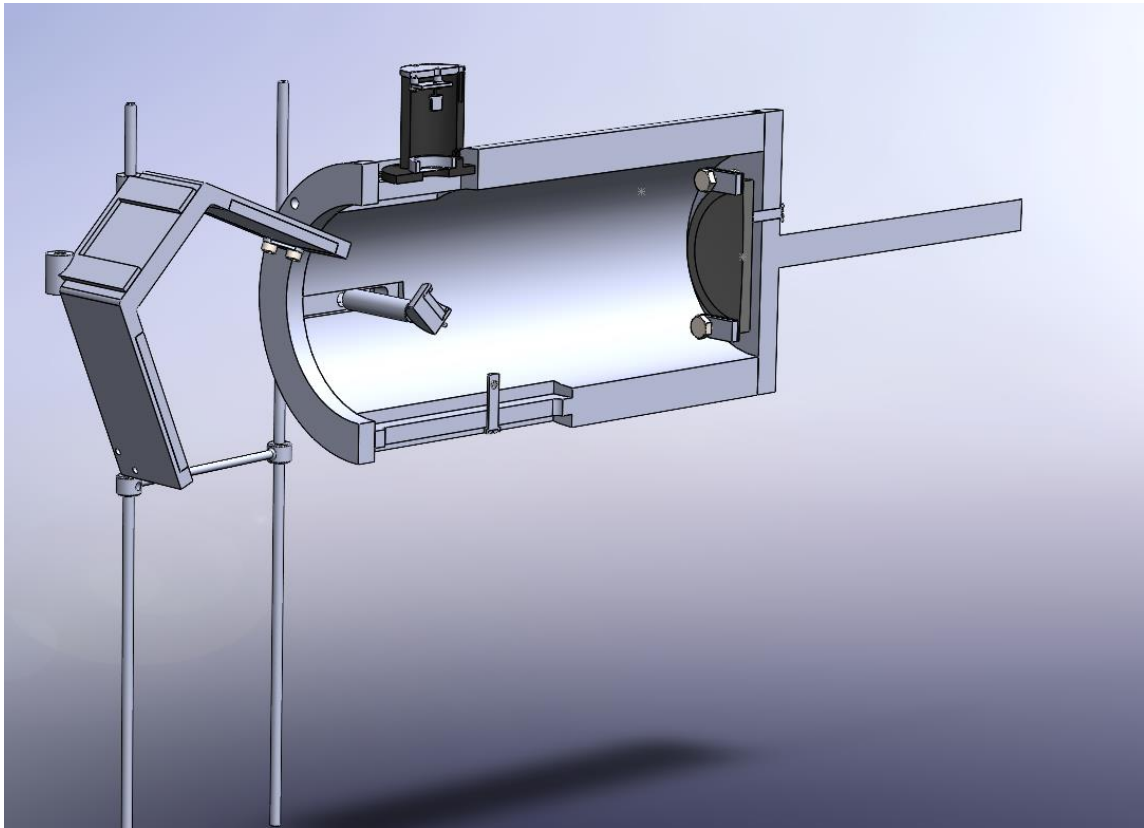


Рис. 3.6. Конструкція коліматора із пента-відбивачем

Конструкція оптимізована для компактності, що є критично важливим для роботизованих бойових платформ у польових умовах.

Таким чином, розроблена конструкція блоку коліматора відповідає технічним вимогам, забезпечуючи високу точність юстування, економію боєприпасів, скорочення часу розгортання та підвищення безпеки оператора під час налаштування озброєння.

3.3 Методика юстування окремих елементів конструкції

Методам юстування системи «холодного» пристрілювання присвячено збірник праць [31] та статтю [32], що перебуває в друці в журналі «Вісник НТУУ «КПІ»», серія «Приладобудування», випуск 69(1), 2025.

Методика юстування блоку коліматора розроблена для забезпечення точного позиціонування оптичних елементів (світлодіода, діафрагми, плоского осьового дзеркала, сферичного дзеркала, що виконує роль об'єктива коліматора, та пента-відбивача) з метою формування стабільного колімованого пучка діаметром 50 мм без

паралаксу. Юстування проводиться з використанням контрольно вимірювальних приладів, зокрема автоколімаційної зорової труби та гоніометра ГС-5, для усунення похибок, пов'язаних із розфокусуванням діафрагми та неправильним базуванням оптичних елементів. Процедура адаптована до конструкції коліматора, що включає світлодіод, діафрагму діаметром 70,6 мкм, плоске осьове дзеркало, сферичне дзеркало з фокусною відстанню 200 мм та пента-відбивач.

Юстування корпусу освітлювача (світлодіода та діафрагми).

Корпус освітлювача містить плату зі світлодіодом, розташованим на відстані 6 мм від діафрагми діаметром 70,6 мкм, яка виготовлена з тонкої алюмінієвої пластини з лазерно вирізаним отвором. Діафрагма фіксується на дні корпусу притискним кільцем за допомогою установчих гвинтів. Для забезпечення точного розташування використовується автоколімаційна зорова труба, розташована вздовж оптичної осі (поз. 4), за пента-відбивачем[32].

Схема установки для контролю приведена на рис. 3.7.

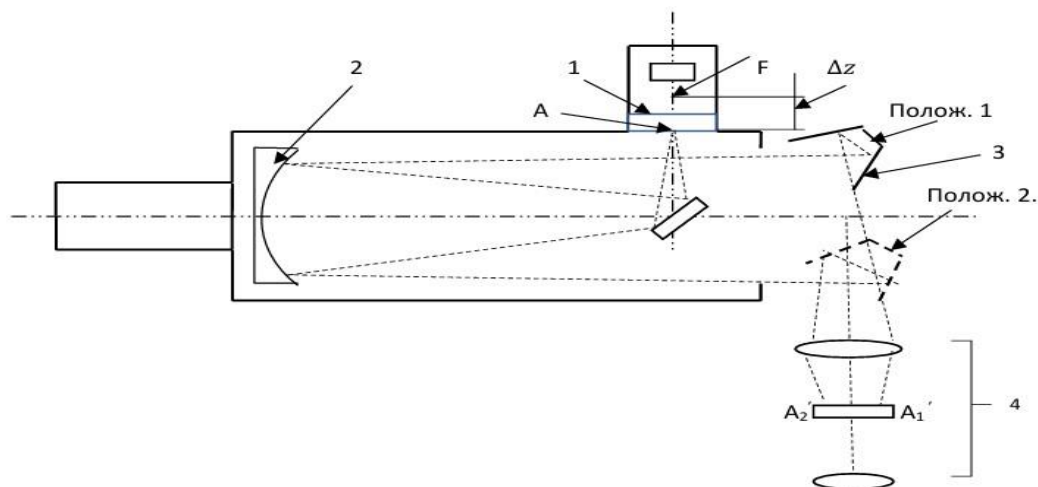


Рис. 3.7. Схема усунення паралаксу коліматора оптико-механічної системи за допомогою зорової труби і пента-відбивача [32]

Якщо діафрагма зміщена відносно фокальної площини об'єктива на величину Δz , на виході коліматора формується пучок, що розходить або сходиться. Для визначення величини зміщення Δz плоске дзеркало переміщується перпендикулярно до оптичної осі на відстань δ . Зміщення зображення діафрагми y вимірюється за сіткою зорової труби. Величина Δz обчислюється за формулою [32]:

$$\Delta z = \frac{2 (f'_{\text{об.кол.}})^2 \cdot y}{2\delta \cdot f_{\text{зор.тр.}}}, \quad (3.1)$$

де $f'_{\text{об.кол.}} = 200$ мм — фокусна відстань сферичного дзеркала, $f_{\text{зор.тр.}}$ — фокусна відстань зорової труби, δ — переміщення плоского дзеркала, y — зміщення зображення діафрагми на сітці зорової труби.

Корпус освітлювача переміщується вздовж оптичної осі, доки зображення діафрагми на сітці зорової труби не стане нерухомим при переміщенні плоского дзеркала, що свідчить про розташування діафрагми точно у фокальній площині. Після цього гвинти корпусу освітлювача затягуються для фіксації.

Юстування плоского осьового дзеркала.

Плоске осьове дзеркало встановлюється в корпусі коліматора за допомогою балок, які переміщуються по пазах. Оправа дзеркала оснащена кільцем із пружиною, що з'єднана з гвинтом на корпусі для регулювання кута нахилу. Юстування проводиться за допомогою автоколімаційної зорової труби для забезпечення точного кута нахилу дзеркала 45° до оптичної осі.

Автоколімаційна зорова труба встановлюється навпроти плоского дзеркала таким чином, щоб світловий пучок від діафрагми, відбитий плоским дзеркалом, потрапляв у поле зору труби. У полі зору спостерігається автоколімаційне зображення перехрестя сітки автоколіматора, відбитого від дзеркальної поверхні плоского дзеркала. За допомогою гвинта та пружини регулюється нахил дзеркала, доки зображення перехрестя не буде центровано на сітці зорової труби, що свідчить про правильне вирівнювання дзеркала під кутом 45° .

Після досягнення центрування зображення перехрестя гвинти балок затягуються, фіксуючи положення плоского дзеркала.

Юстування об'єктива коліматора.

Сферичне дзеркало (об'єктив коліматора) встановлюється на направляючій із фланцем, оснащеним трьома юстувальними гвинтами для регулювання нахилу по осях X та Y. Юстування проводиться в темній кімнаті з використанням автоколімаційної зорової труби, розташованої навпроти вихідної зіниці коліматора.

Світлодіод освітлює діафрагму, пучок відбивається від плоского дзеркала до сферичного дзеркала, формуючи колімований пучок. Зорова труба налаштовується для спостереження зображення діафрагми. Юстувальні гвинти фланця регулюються, доки зображення діафрагми не стане чітким і центрованим на сітці зорової труби, що свідчить про правильне вирівнювання об'єктива.

Після досягнення чіткого зображення гвинти фланця затягуються для статичної фіксації сферичного дзеркала.

Юстування пента-відбивача.

Пента-відбивач встановлюється в корпусі коліматора на спеціальному столику, який дозволяє регулювати його орієнтацію. Юстування проводиться за допомогою гоніометра ГС-5 та автоколімаційної зорової труби, як показано на рисунку 3.8. Пента-відбивач має дзеркальні грані для забезпечення відбиття пучка під кутом 90° [32].

Автоколімаційна зорова труба встановлюється в полі зору пента-відбивача. У полі зору труби спостерігається автоколімаційне зображення перехрестя сітки автоколіматора, відбитого від дзеркальної грані пента-відбивача. Столик пента-відбивача повертається та нахиляється за допомогою гоніометра ГС-5, доки зображення перехрестя не буде центровано на сітці зорової труби, що забезпечує правильну орієнтацію пента-відбивача для відбиття пучка під кутом 90° .

Після центрування зображення перехрестя всі вузли пента-відбивача фіксуються в юстованому положенні шляхом затягування відповідних гвинтів.

					<i>ДП.ПО11.00001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Змін.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		59

Схема станда для юстування зображена на рис. 3.8.

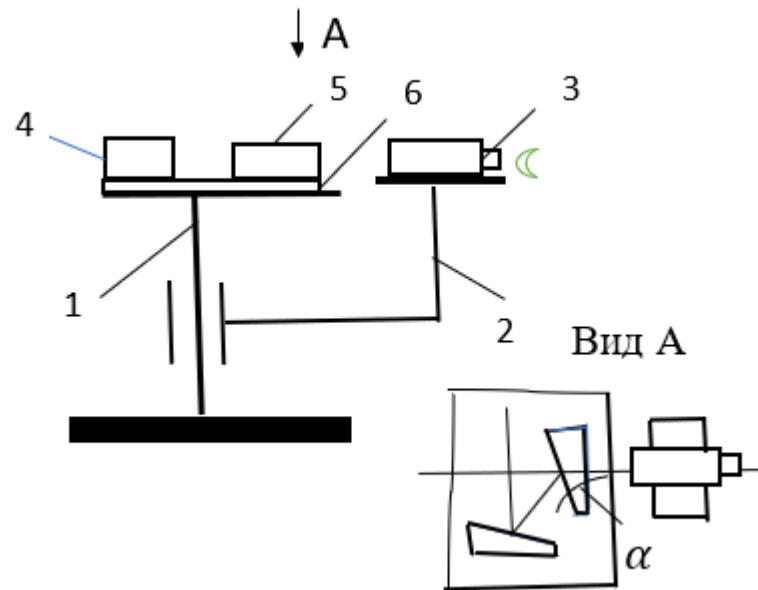


Рис. 3.8. Схема станда для юстування пента-відбивача [32]:

1 – гоніометр; 2– поворотна алідада гоніометра; 3 – автоколімаційна зорова труба гоніометра; 4 – фотоприймач системи прицілювання; 5 – пента-відбивач; 6 – направляюча оптико-механічної системи «холодного» пристрілювання

Запропонована методика юстування забезпечує точне вирівнювання всіх компонентів блоку коліматора з використанням автоколімаційної зорової труби та гоніометра ГС-5, що усуває похибки, пов'язані з паралаксом та неправильним базуванням. Точне позиціонування діафрагми у фокальній площині, правильне вирівнювання плоского дзеркала, сферичного дзеркала та пента-відбивача гарантують формування стабільного колімованого пучка, який імітує віддалену ціль у видимому та інфрачервоному діапазонах. Процес юстування є послідовним і придатним для використання в польових умовах завдяки чітким критеріям контролю за допомогою контрольно вимірювальних приладів.

Висновки до розділу 3

Розроблена конструкція коліматора для автоматизованої системи "холодного" пристрілювання роботизованих комплексів. Креслення складається з 5 листів формату А1, наведених у додатках.

Конструкція коліматора забезпечує точність встановлення у стволі зброї з похибкою 0,01 мм завдяки використанню посадки h7 на діаметрі направляючої.

Вона також передбачає фокусування діафрагми коліматора для компенсації паралактичної похибки шляхом переміщення вузлів освітлювача та плоского дзеркала вздовж оптичної осі коліматора з одночасним контролем за допомогою автоколімаційної зорової труби. Похибка базування становить кілька мікронів.

Конструкція забезпечує регулювання відстані між оптичною віссю коліматора та оптичною віссю телевізійної системи прицілювання шляхом пересування пента-відбивача вздовж направляючої в діапазоні від 100 до 200 мм.

Розроблена конструкція відповідає вимогам, зазначеним у завданні на дипломний проєкт.

					<i>ДП.ПО11.00001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Змін.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		61

Висновок

Оптико-механічна система «холодного» пристрілювання, що використовує дзеркальний коліматор і пента-відбивачі, має суттєві переваги над сучасними системами. Їй не потрібен віддалений екран, і її можна застосовувати в широкому спектральному діапазоні, а також за різних відстаней між стволом зброї та системою дистанційного прицілювання.

Оптична схема коліматора за схемою Ньютона, описана в другому розділі, є ефективною та забезпечує високу якість роботи системи. Основні конструктивні параметри, такі як відстані між елементами (6 мм від джерела до діафрагми, 40 мм до осьового дзеркала, 160 мм до сферичного дзеркала, 370 мм до пента-відбивача), а також світлові діаметри осьового дзеркала – 13 мм і пента-відбивача – 55 мм, оптимально узгоджені для виконання поставлених завдань. Діаметр точкової діафрагми – 70 мкм забезпечує необхідну точність фокусування випромінювання.

Енергетичний розрахунок показує, що основні втрати випромінювання спричинені він'єтуванням на точковій діафрагмі, осьовому дзеркалі та через неузгодженість апертур об'єктивів коліматора і телевізійної системи прицілювання. Незважаючи на це, потужність випромінювання на матриці (88,26 мкВт у світловій плямі та 37 мкВт на пікселі) значно перевищує порогову чутливість приймача ($8,7 \times 10^{-12}$ мВт), що забезпечує високе співвідношення сигнал/шум і значний запас чутливості. Це гарантує стабільність сигналу, мінімальний вплив шумів і високу точність вимірювань. Завдяки цьому система демонструє високу ефективність, надійність і придатність для точних оптичних вимірювань, що робить її перспективною для використання в задачах, де потрібна стабільна та якісна передача сигналу.

Створено конструкцію коліматора для автоматизованої системи «холодного» пристрілювання роботизованих комплексів. Креслення складається з 5 листів формату А1, наведених у додатках.

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		62

Конструкція коліматора забезпечує точність розміщення у стволі зброї з похибкою 0,01 мм завдяки використанню посадки h7 на діаметрі направляючої.

Крім того, вона передбачає фокусування діафрагми коліматора для усунення паралактичної похибки шляхом переміщення вузлів освітлювача та плоского дзеркала вздовж оптичної осі коліматора з одночасним контролем через автоколімаційну зорову трубу. Похибка базування становить кілька мікронів.

Конструкція забезпечує регулювання відстані між оптичною віссю коліматора та оптичною віссю телевізійної системи прицілювання шляхом пересування пента-відбивача вздовж направляючої в межах від 100 до 200 мм.

Розроблена конструкція коліматора відповідає вимогам, зазначеним у завданні на дипломний проєкт, і є високоточною, компактною, надійною та адаптованою до бойових умов системою. Вона забезпечує ефективне «холодне» пристрілювання з мінімальними затратами ресурсів і високим рівнем безпеки. Таким чином, проєкт продемонстрував практичну доцільність створення блоку коліматора в рамках сучасних вимог до автоматизації військових і навчальних процесів.

					<i>ДП.ПО11.00001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Змін.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		63

Література

1. О. К. Кучеренко, М. В. Сенаторов. Однолінзовий коліматорний прицільний пристрій. *Journal of Optical Technology*, vol.64, p.1034--1035,1997.
2. Opticoelectron. Presentation 2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.opticoel.com/wp-content/uploads/2019/10/Opticoelectron-2019-Presentation V3.pdf>
3. В. І. Микитенко, М. В. Сенаторов, “Модернізація авіаційного стрілецького прицілу комплексуванням інформаційних каналів”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*, Вип. 40, С.86 – 93, 2010.
4. О. К. Кучеренко, Е. В. Бойкова. «Про неузгодженість візирної та локаційної осей лазерного далекоміра прицілу», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*, Вип. 33, С. 48 – 54, 2007.
5. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/80747723/Jane-s-Armour-and-Artillery-2005-2006>
6. Патент США US7347002B2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US7347002B2/en>
7. Трубки холодного пристрілювання ТХП, ТХП-1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://hotopribor.ck.ua/products/defense/prylady_control/thp-1. 05/09/2024. pdf.
8. Laser bore sight. Патент США №5787631А, МПК F41G, 33/02, 2014.
9. М. В. Сенаторов, А. С. Довгополий, А. В. Гурнович та ін. «Холодне» пристрілювання оптичних прицілів бойових роботизованих комплексів. *Озброєння та військова техніка: Науково-технічний журнал*, Київ: ЦНДІ ОБТЗСУ, № 3(19), С. 47-51, 2018.
10. Пат. США №5787631А, МПК F41G 33/02. Laser bore sight.
11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/innovatsii-transfer-tehnologiy/publikatsiyi/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-tezi-dopovidey.pdf>

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		64

12. In-depth Telescope. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:<https://catalogue.museogalileo.it/indepth/Telescope.html>
13. Оптичні телескопи. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://unit.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/doc/telescopes.pdf>
14. Ньютонівський телескоп. Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу:<https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF>
15. Телескоп Кассегрена. Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу:https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF_%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B5%D0%B3%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B0
16. Грегоріанський телескоп . Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу:[F](https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BD%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B)
17. Телескоп Річі — Кретьєна. Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу:[F](https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF_%D0%A0%D1%96%D1%87%D1%96_%E2%80%94%D0%9A%D1%80%D0%B5%D1%82%D1%8C%D1%94%D0%BD%D0%B0)
18. Живець Ю.М., Шумигай О.В., Єрмоленко О.В., Ветошкін О.Г Застосування тепловізорів в системах виявлення, спостереження та прицілювання DOI: 10.37701/dndivsovt.11.2022.05 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/147/145>
19. Роль і характеристики тепловізорів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukr.media/science/1371/>

20. Аналіз розвитку та застосування тепловізорів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.trimen.com.ua/ua/blog/analiz-rozvytku-ta-zastosuvannia-teplovizoriv.html>
21. Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2007. – С.363.
22. Тепловізійний приціл. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opticstore.com.ua/ua/news/read/chto-takoe-teplovizionnyj-ricel>
23. Тепловізори та тепловізійні приціли: огляд принципів роботи та застосування. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://erudyt.net/inshi/remont-budynku/teplovizory-ta-teploviziyni-prytsily-ohliad-pryntsypiv-roboty-ta-zastosuvannia.html>
24. Принцип роботи світлодіодів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ledtest.vestum.ua/uk/study/princip-roboti-svitlodiodiv?utm_source=chatgpt.com
25. Datasheet OSRAM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/231108/EVERLIGHT/67-21SURC-S530-A2-TR8.html>
26. Datasheet LL-504PGC1E-G5-1C [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://storage.sea.com.ua/tech_info/Lucky%20Light/LL-504PGC1E-G5-1C.pdf
27. Кучеренко О.К. К50 Розрахунок і конструювання оптичних приладів: Навч. посіб.- К.: ІВЦ «Політехніка», 2011. - С.335
28. Об'єктив Yongnuo 17mm f/1.7M [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ek.ua/ua/YONGNUO-17MM-F-1-7M.htm>
29. Матриця Sony ICX445AQA CCD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Datasheet for Sony ICX445AQA CCD Sensor
30. І. Г. Чиж. Теорія оптичних систем. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cions.kpi.ua/Arhiv/chiz/tos.pdf>

					<i>ДП.П011.00001.000 ПЗ</i>	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		66

31. Кучеренко О. К. Проектування коліматора для системи «холодного» пристрілювання. Збірник праць XXIV Міжнародної науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 13-14 травня 2025 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
32. Кучеренко О. К. Проектування оптико-механічної системи «холодного» пристрілювання. Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування, Вип. 69(1). 2025 (в друці).
33. Комп’ютерні методи проектування оптико-механічних систем: навч. посіб. для студентів для здобуття ступені бакалавра за освітньою програмою «Комп’ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»; укладач: О. К. Кучеренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 20 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. –171 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63158>

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
						67
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК

					ДП.ПО11.00001.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		68