

Міністерство освіти і науки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В.І. Микитенко, В.М. Сенаторов, О.Д. Мельник

ОПТИЧНІ СИСТЕМИ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ

Монографія

Рекомендовано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

КИЇВ - 2023

УДК 681.7.013

K61

Рецензенти: *Гурнович А. В.*, доктор техн. наук, НДІ ОБТ ЗСУ
Тягур В. М., доктор техн. наук, НТК КП СПБ «Арсенал»

Відповідальний редактор *Чиж І. Г.*, доктор техн. наук, професор

Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

(протокол №8 від 12.12.2022 р.)

K61 Оптичні системи наземних роботизованих комплексів. Монографія / В.І. Микитенко, В.М. Сенаторов, О.Д. Мельник – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 132 с.

ISBN 978-966-999-313-7

У монографії розглянуто методичні підходи побудови прицільно-пошукових систем наземних роботизованих комплексів і апаратури контролю положення лінії прицілювання. Обґрунтовано вимоги до апаратури контролю і дано аналіз апаратури, яка існує. Розглянуто схеми побудови елементів прицільно-пошукових систем бойових модулів: робочого місця оператора, камер широкого і вузького поля зору і бойового модуля в цілому. Описано схемні рішення апаратури контролю положення лінії прицілювання для первинного юстування при виробництві, в процесі стендових випробувань, в ході перевірконої стрільби на полігоні та в місцях експлуатації наземних роботизованих комплексів.

Для фахівців, що розробляють наземні роботизовані комплекси, а також для інженерно-технічних працівників, студентів, які цікавляться новітніми розробками в цій галузі техніки.

ISBN 978-966-999-313-7

© В.І. Микитенко, В.М. Сенаторов, О.Д. Мельник

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	5
Вступ	6
1 ПОБУДОВА БОЙОВИХ МОДУЛІВ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ	9
1.1 Побудова прицільно-пошукових систем бойових модулів наземних роботизованих комплексів	9
1.2 Побудова апаратури контролю положення лінії прицілювання прицільно-пошукових систем	12
1.2.1 Закономірності між характеристиками прицільно - пошукової системи НРК і зорового аналізатору оператора, фоно-цільовою обстановкою та впливом на результати виконання бойової задачі	12
1.2.2 Вимоги до апаратури контролю положення лінії прицілювання бойових модулів	16
1.2.3 Апаратура контролю положення лінії прицілювання прицільно-пошукових систем, що існує	17
1.3 Експертне оцінювання та побудова пріоритетного ряду апаратури контролю положення лінії прицілювання прицільно-пошукових систем	27
Висновки	28
Література до розділу 1	29
2 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПРИЦІЛЬНО-ПОШУКОВИХ СИСТЕМ БОЙОВИХ МОДУЛІВ	35
2.1 Організація робочого місця оператора	36
2.1.1 Використання системи доповненої реальності	38
2.1.2 Вибір формувача зображення для нашоломного індикатора	40
2.2 Розрахунок оптичної схеми	41
2.2.1 Габаритний розрахунок рефракторної оптичної схеми індикатору	42
2.2.2 Габаритний розрахунок рефлекторної оптичної схеми індикатору	54
2.2.3 Синтез голографічної оптичної схеми індикатору	57
2.3 Вимоги до компоновки індикатора на захисному шоломі/голові оператора	60
2.4 Побудова камери широкого поля зору	60
2.5 Побудова камери вузького поля зору	68

2.6	Алгоритм роботи оператора НРК	70
2.7	Конструктивна побудова прицільно-пошукової системи бойового модуля	71
2.8	Визначення часу виявлення та розпізнавання цілі	74
2.9	Використання поляризаційного тепловізора	81
2.9.1	Обґрунтування поляризації власного теплового випромінювання	81
2.9.2	Апаратура визначення тримірної форми цілі	84
	Висновки	88
	Література до розділу 2	89
	3 АПАРАТУРА КОНТРОЛЮ БОЙОВИХ МОДУЛІВ	95
3.1	Елементна база для апаратури контролю лінії прицілювання бойових модулів	95
3.2	Апаратура для первинного юстування прицільно-пошукової системи бойового модуля	97
3.3	Алгоритм юстування контрольно-юстувальної апаратури	100
3.4	Апаратура контролю стабільності лінії прицілювання в процесі стендових випробувань	103
3.4.1	Фіксація дзеркала на зброї	103
3.4.2	Джерело підсвічування сітки колімаційного каналу	103
3.4.3	Оптичні схеми колімаційного каналу	105
3.4.4	Апаратура і алгоритм контролю стабільності лінії прицілювання	108
3.5	Застосування методу сегментації зображень при контролі стабільності лінії прицілювання в процесі стендових випробувань	112
3.6	Апаратура контролю стабільності лінії прицілювання в процесі перевірконої стрільби	115
3.6.1	Алгоритми перевірконої стрільби зі зброї БМ НРК	116
3.7	Синтез апаратури контролю стабільності лінії прицілювання в процесі експлуатації	126
	Висновки	128
	Література до розділу 3	129

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

OLED	органічний світловипромінюючий діод
БМ	бойовий модуль
ВКП	відео-контрольний пристрій
ГОЕ	голографічний оптичний елемент
ЕПТ	електронно-променева трубка
ІЧ	інфрачервоний
КВБ-Д	колімаційний і вимірювальний канал із дзеркалом
КВПЗ	камера вузького поля зору
КМОН	комплементарна система метал-оксид-напівпровідник
КШПЗ	камера широкого поля зору
КЮА	контрольно-юстувальна апаратура
ЛПХП	лазерний прилад «холодного» пристрілювання
МПФ	модуляційна передавальна функція
НРК	наземний роботизований комплекс
НШІ	нашоломний індикатор
ОВТ	озброєння та військова техніка
ПЗЗ	прилад із зарядовим зв'язком
ППС	прицільно-пошукова система
СК	ствольний коліматор
СТВ	середня точка влучення
ТХП	трубка «холодного» пристрілювання
ПВ	фотоприймальний пристрій

ВСТУП

Аналіз досвіду останніх воєнних конфліктів показує, що сучасні бойові дії, які ведуться згідно з концепцією мережецентричної війни, характеризуються такими особливостями: збільшенням ролі інформаційного протиборства, використанням нетрадиційних форм ведення бойових дій, підвищенням точності і вибіркової дії зброї, впровадженню нових систем управління, розвідки, комп'ютерного моделювання. Виходячи з цих особливостей, загальними технологічними тенденціями розвитку озброєння є: інтелектуалізація, мініатюризація, багатофункціональність, автономність.

Відповідно до поглядів вітчизняних і закордонних спеціалістів в бойових діях майбутнього одним з найперспективніших видів озброєння та військової техніки, що інтегрує в собі більшість перелічених особливостей, будуть роботизовані комплекси військового призначення [1]. Передбачається, що широкомасштабне впровадження робототехніки змінить способи ведення військових операцій і технічний обрис перспективних систем озброєння та військової техніки, підвищить ефективність їх застосування, а також скоротить втрати особового складу. Створення роботизованих комплексів військового призначення потребує суттєвого опрацювання найважливіших технологій, необхідних для створення усієї номенклатури перспективних роботизованих засобів. Чільне місце серед цих технологій займає створення оптичних і оптико-електронних засобів, що входять в склад бойового модуля роботизованого комплексу: телевізійний і тепловізійний приціли, камера широкого поля зору і лазерний далекомір.

В Україні на сьогодні розробниками наземних роботизованих комплексів є цивільні підприємства, які при їх створенні з власної ініціативи не в повній мірі враховують особливості ведення сучасної збройної боротьби, специфіку бойових завдань, що покладаються на такий складний ерготехнічний комплекс як наземний роботизований

комплекс. При виборі компонувальних рішень і параметрів наземного роботизованого комплексу розробники часто спираються на власний, невійськовий досвід або використовують принципи побудови існуючих зразків екіпажного озброєння та військової техніки. Аналіз сучасного стану прицільно - пошукових систем бойових модулів показує, що усі вони компонуються як окремі агрегати в загальному корпусі, а інформація виводиться на бортовий віддалений монітор. При цьому не враховуються особливості зорової системи людини, особливості роботи оператора при одночасному управлінні рухом і виконанні бойової задачі, вірогідність виведення з ладу одного з прицілів.

Додаткові складнощі в проектуванні та практичній реалізації наземних роботизованих комплексів в Україні викликає низький рівень напрацювань по створенню важливої їх складової – прицільних та оглядових засобів. Основною задачею, яка покладається на приціли, є наведення зброї на ціль із заданими показниками точності, у відповідності до даних таблиць стрільби. Процес наведення зброї полягає в суміщенні лінії прицілювання, сформованої прицілом, з точкою прицілювання в площині цілі. Кутове положення лінії прицілювання визначається стабільністю положення її елементів. Тому нештатні зміни в роботі будь-якого з елементів прицілу ведуть до зміни кутового положення лінії прицілювання. В свою чергу це приведе до зниження точності виконання основної функції прицілу - наведення зброї на ціль.

До показників якості прицільної техніки щодо визначення положення лінії прицілювання слід віднести: стабільність її орієнтації відносно початкового положення в ході виконання бойової задачі; стабільність її положення при зміні режимів роботи прицілу. Усі перераховані вище показники включені в перелік перевірок багатьох видів випробувань прицільної техніки [2]. Процес виконання усіх етапів випробувань прицілів повинен супроводжуватися обов'язковим метрологічним контролем об'єктів випробування.

Методи і засоби контролю характеристик прицільно-пошукових систем, що застосовуються до теперішнього часу, не здатні в повній мірі забезпечити виконання покладених задач з потрібними показниками точності.

Отже наразі склалась ситуація, коли існує велика перспективна галузь розвитку техніки, яка є особливо актуальною в сьогоденних умовах для України. Також існують певні напрацювання в суміжних галузях, які можна застосувати для пришвидшення розвитку означеної галузі, а саме створення оптико-електронних засобів прицілювання роботизованих наземних комплексів. Для цього необхідно систематизувати наявні дані та запропонувати методологію розроблення спеціалізованих оглядово-прицільних оптико-електронних систем. Перелічена система суперечностей спонукала авторів на створення даної монографії, яка на їхню думку дасть відповідь на ряд проблемних питань створення наземних роботизованих комплексів.

1 ПОБУДОВА БОЙОВИХ МОДУЛІВ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1 Побудова прицільно-пошукових систем бойових модулів наземних роботизованих комплексів

Розвиток високоточної зброї, поява нових засобів радіоелектронної боротьби, розвідки і навігації космічного базування обумовив появу нової форми збройної боротьби – високоточного протистояння, суть якого – напружена боротьба на суші, на морі, в повітрі та космосі. Бойові дії на суші будуть проходити в формі оборонно-наступальних і зустрічних бойових дій, рейдових дій з глибоким вклинюванням у оперативні (бойові) порядки військ сторін для використання результатів вогневих ударів і закріплення досягнутого успіху.

До 50-х років минулого століття головним об'єктом ураження була жива сила супротивника. Сьогодні центр силового протистояння змістився в повітряно-космічну і інформаційну сфери, область управління державою та її економікою. Прагнення максимально зберегти живу силу в ході бойових дій веде до активного впровадження у війська бойових роботизованих комплексів.

Проведений авторами робіт [3 - 5] аналіз тенденцій розвитку озброєння та військової техніки (ОВТ) провідних країн дозволив чітко виділити важливу на їхній погляд світову тенденцію - підвищення ступеня автоматизації засобів ведення збройної боротьби, створення роботизованих, автономних та дистанційно керованих зразків та систем ОВТ. Як показано в роботі [6], найближчою перспективою для України є НРК середнього класу.

Досвід використання НРК середнього класу вказує на те, що їхнім основним завданням є виконання бойових та інженерних задач [7]:

- ведення розвідки;
- прорив оборони супротивника;
- забезпечення оборони роботизованими вогневими точками;
- придушення вогневої протидії супротивника;
- ліквідація позаштатних ситуацій з небезпечними боєприпасами, знешкодження вибухонебезпечних предметів;
- проведення аварійно-відновлювальних робіт;
- евакуація з поля бою особистого складу і техніки в бойових умовах;
- інженерна розвідка, мінування та розмінування;
- постачання боєприпасів і паливо-мастильних матеріалів в зону бойових дій;
- патрулювання, охорона районів, місць дислокації частин, об'єктів і перехресть доріг.

Для вирішення цих завдань в структурі НРК передбачене шасі, бойовий або інженерний модуль та системи дистанційного управління шасі і модулем [8]. В разі інсталяції на шасі бойового модуля (БМ) - в його структуру входять: зброя (кулемет типу ПКМ 7,62 мм), лазерний далекомір і система технічного зору. Система технічного зору умовно ділиться на дві підсистеми: перша забезпечує контроль руху НРК, друга (прицільно-пошукова) забезпечує цілодобовий пошук цілей і прицілювання зброї. Для цього в склад прицільно-пошукової системи (ППС) входять: телевізійна камера широкого поля зору для пошуку цілей, а також телевізійний і тепловізійний приціли для прицілювання у видимій та інфрачервоній областях спектру. Інформація системи технічного зору відображається на віддалених дисплеях системи дистанційного управління. На даний момент використовуються дві схеми компоновки ППС. В першій (наприклад, НРК «Ласка», рис. 1.1) усі елементи ППС розташовані знизу або зверху зброї в загальному корпусі так, що їхні оптичні осі лежать у горизонтальній площині. В другій (наприклад, НРК «Піранья», рис. 1.2) усі елементи ППС розташовані збоку зброї в спільному корпусі

так, що їхні оптичні осі формують трикутник. Це веде до того, що влучання кулі в загальний корпус призводить до виводу з ладу усієї ППС.



Рисунок 1.1 –НРК «Ласка»



Рисунок 1.2 - НРК «Піранья»

В Україні на теперішній час розробниками НРК з власної ініціативи є цивільні підприємства, які при створенні НРК не в повній мірі враховують особливості ведення сучасної збройної боротьби, специфіку бойових завдань, що покладаються на НРК. При виборі компоновальних рішень і параметрів НРК розробники часто спираються на власний, невійськовий досвід або використовують принципи побудови існуючих зразків екіпажного ОВТ. Аналіз сучасного стану прицільно-пошукових систем рухомих об'єктів [9] показує, що усі вони компонуються як окремі агрегати в загальному корпусі, а інформація виводиться на бортовий віддалений монітор. При цьому не враховуються особливості зорової системи людини, особливості роботи оператора при одночасному управлінні рухом і виконанні бойової задачі, має місце низька бойова живучість, обумовлена великою площею враження ППС при влучанні боєприпаса контактної дії.

1.2 Побудова апаратури контролю положення лінії прицілювання прицільно-пошукових систем

1.2.1 Закономірності між характеристиками прицільно - пошукової системи НРК і зорового аналізатору оператора, фоно-цільовою обстановкою та впливом на результати виконання бойової задачі

Ймовірнісна модель функціонування зразків озброєння протиборчих сторін, що існує [10], встановлює ймовірність перемоги однієї із сторін $P_i(t)$, виходячи з даних про ефективні потоки пострілів і тривалості функціонування (обстрілу):

$$P_{A \rightarrow B}(t) = \exp(-bt)[1 - \exp(-at)] / [1 - (1 - \exp(-at))(1 - \exp(-bt))];$$
$$P_{B \rightarrow A}(t) = \exp(-at)[1 - \exp(-bt)] / [1 - (1 - \exp(-at))(1 - \exp(-bt))], \quad (1.1)$$

де $P_{A \rightarrow B}(t)$ – ймовірність того, що зразок В буде вражений зразком А за час t_A ; $P_{B \rightarrow A}(t)$ – ймовірність того, що зразок А буде вражений зразком В за час t_B ; a і b – щільність ефективного потоку пострілів зразків А і В відповідно. При встановленій ймовірності виконання бойової задачі $P_i(t)$ і при відомій щільності ефективних потоків пострілів зразків система рівнянь (1.1) однозначно визначає тривалості функціонування t_A і t_B протиборчих зразків. Із системи рівнянь (1.1) також знаходимо:

$$P_{A \rightarrow B}(t) / P_{B \rightarrow A}(t) = F = [\exp(at_A) - 1] / [\exp(bt_B) - 1]. \quad (1.2)$$

Якщо відношення $P_{A \rightarrow B}(t) / P_{B \rightarrow A}(t)$ позначити F , то з (1.2) випливає наступне.

1. Якщо $t_A = t_B$, то $F > 1$ виконується при умові $a > b$, а це означає, що зразку А необхідно збільшувати щільність ефективного потоку пострілів за рахунок скорострільності (активна протидія).
2. Якщо $a = b$, то $F > 1$ виконується при умові $t_A > t_B$, а це означає, що зразку А необхідно збільшувати тривалість ефективного потоку пострілів за рахунок відкриття стрільби раніш чим протиборча сторона В або впливати на тривалість протидії за рахунок більш пізнього початку стрільби зразка В (пасивна протидія). Задля пасивної протидії сторона А повинна маскуватись, зменшувати свої

видимі для сторони В розміри та зменшувати швидкість свого пересування.

Ця перевага у початку стрільби сторони А $\Delta\tau = (t_A - t_B)$ має забезпечуватись за рахунок меншого часу на виявлення ($\Delta\tau_{\text{вияв}}$) і розпізнавання ($\Delta\tau_{\text{розп}}$) цілі оператором за допомогою прицільно-пошукової системи. Тобто можна записати [10, 11]:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{\text{вияв}} + \Delta\tau_{\text{розп}} = (\tau_{\text{виявВ}} - \tau_{\text{виявА}}) + (\tau_{\text{розпВ}} - \tau_{\text{розпА}}), \quad (1.3)$$

де $\tau_{\text{виявВ}}$ – час виявлення цілі стороною В, $\tau_{\text{виявА}}$ – час виявлення цілі стороною А, $\tau_{\text{розпВ}}$ – час розпізнавання цілі стороною В, $\tau_{\text{розпА}}$ – час розпізнавання цілі стороною А.

Проаналізуємо можливість більш раннього виявлення цілі для збільшення t_A , виходячи з теорії випадкового пошуку. Як відомо [12], накопичена за час τ ймовірність виявлення цілі $P_{\text{вияв}}(\tau)$ визначається залежністю

$$P_{\text{вияв}}(\tau) = 1 - \exp(-\tau\mu), \quad (1.4)$$

де μ – емпіричний коефіцієнт, що залежить від параметрів прицільно-пошукової системи та фоно-цільової обстановки в місці проведення бойової операції і розраховується за формулою [13]:

$$\mu = \left(\frac{\aleph(C/[1+q])^2 (\alpha\Gamma_{\text{ел}})^3 \tau_1 \tau_2 (B_\phi)^{0,3}}{(2\beta)^2} \right), \quad (1.5)$$

де $\aleph$ – коефіцієнт пропорційності, C – контраст, з яким спостерігається ціль на фоні яскравістю B_ϕ , q і τ_1 – світлорозсіювання і світлопропускання прицільно-пошукової системи, α – кутовий розмір цілі, $\Gamma_{\text{ел}}$ – електронне збільшення прицільно-пошукової системи, τ_2 – світлопропускання траси між протиборчими сторонами і 2β – кутовий розмір зони пошуку цілі.

При цьому слід враховувати, що до прицільно – пошукових систем БМ пред'являються високі вимоги до світлорозсіювання і світлопропускання, тому у формулі (1.5) показник q можна прийняти рівним 0, а τ_1 рівним 1.

З формули (1.4) знаходимо:

- час τ_A виявлення цілі В стороною А становить:

$$\tau_{виявA} = \ln[1 - P_{вияв}(\tau)] / \mu_A; \quad (1.6)$$

- час τ_B виявлення цілі А стороною В становить:

$$\tau_{виявB} = \ln[1 - P_{вияв}(\tau)] / \mu_B. \quad (1.7)$$

Таким чином при рівній ймовірності виявлення маємо:

$$\Delta\tau_{вияв} = \ln[1 - P_{вияв}(\tau)] (\mu_B^{-1} - \mu_A^{-1}). \quad (1.8)$$

Із (1.8) випливають добре відомі рекомендації. Для того щоб виявити супротивника раніше, ніж він виявить тебе, треба використовувати прицільно – пошукову систему із збільшенням більшим, ніж збільшення прицільно – пошукової системи супротивника і звужувати зону пошуку. Але при цьому зменшується вірогідність потрапляння цілі в поле зору прицільно – пошукової системи, тому в БМ використовуються дві оптичні системи: одна з широким полем зору для пошуку цілі, друга з вузьким полем зору для розпізнавання і прицілювання. Для того щоб супротивник витрачав більше часу на виявлення цілі, треба мінімізувати свою швидкість переміщення або маскуватися - знижувати свій контраст і видимі супротивнику розміри.

Порівняльний аналіз вітчизняного і зарубіжного парку НРК, який систематично дається на сторінках журналу «Озброєння та військова техніка», а також [14], показує, що з обох сторін на однотипних зразках використовуються прицільно – пошукові системи з близькими значеннями максимального збільшення і відповідного йому поля зору.

Тому говорити про більш раннє виявлення цілі тільки за рахунок поля зору і збільшення не доводиться. Звідси на перший план знову впливають рекомендації з пасивної протидії противнику. Інша річ при протиборстві різних видів ОВТ, наприклад, НРК проти БМП. Саме для таких варіантів протиборства має бути проведено моделювання, оцінено співвідношення ймовірностей ураження F для типової фоно-цільової обстановки та всіх відомих параметрів

прицільно - пошукової системи і розроблені відповідні рекомендації [15, 16].

Сучасні підходи до питання розпізнавання та ідентифікації цілі базуються на моделі спостерігача. Для задачі, що виконується оператором НРК, коли алфавіт цілей обмежений, найбільш прийнятна модель, що базується на припущенні, що при розпізнаванні цілей система «око – мозок» працює як оптимальний двомірний фільтр з частотною характеристикою, яка визначається рівнянням [17]:

$$F_i(\omega_y, \omega_z) = \left\{ \iint_{-\infty} B_i(y, z) \exp[-j(\omega_y y + \omega_z z)] dy dz \right\}^*, \quad (1.9)$$

де $*$ – знак комплексного спряження, $B_i(y, z)$ – еталонні зображення i -го об'єкта, що піддані такому ж спотворенню, яке відрізняє пред'явлене зображення, ω_y, ω_z – просторові частоти в області зображень. Оскільки шум в цьому випадку є гаусовим, то ймовірність розпізнавання цілі $P_{розп}$ визначається відомим виразом

$$P_{розп} = 0,5 \left(1 + \Phi \left[\frac{(S/N)_i}{2} \right] \right). \quad (1.10)$$

Тут і далі в тексті $\Phi(x_0)$ – інтеграл ймовірності Гауса вигляду

$$\Phi(x_0) = (\sqrt{2\pi})^{-0,5} \int_0^{x_0} \exp(-0,5x^2) dx,$$

а $(S/N)_i$ – відношення сигнал/шум на виході узгодженого фільтру, що визначається формулою

$$(S/N)_i = \frac{\left(\iint_{-\infty} |F_i(\omega_y, \omega_z)|^2 d\omega_y d\omega_z \right)}{\left(\iint_{-\infty} |F_i(\omega_y, \omega_z)|^2 N(\omega_y, \omega_z) d\omega_y d\omega_z \right)^{\frac{1}{2}}},$$

де $N(\omega_y, \omega_z)$ – спектральна щільність потужності шуму.

Таким чином формула (1.10) визначить ймовірність розпізнавання цілі з урахуванням характеристик зорового аналізатору оператора.

Однак апіорі можна сказати, що час розпізнавання залежить від обсягу алфавіту цілей і тренованості персоналу. Можна припустити, що з обох протиборчих сторін бере участь тренований персонал, тобто $\tau_{розпA} = \tau_{розпB}$, тому на даному етапі в формулі (1.3) доцільно прийнято $\Delta\tau_{розп} = 0$ і як результат:

$$\Delta\tau = (\tau_{виявB} - \tau_{виявA}). \quad (1.11)$$

Після підстановки (1.11) в (1.2) отримуємо модель функціонування зразків озброєння протиборчих сторін з урахуванням характеристик прицільно-пошукової системи та фоно-цільової обстановки в місці протиборства:

$$F = P_{A \rightarrow B}(t) / P_{B \rightarrow A}(t) = [\exp(at_A) - 1] / \{\exp[b(t_A + \Delta\tau)] - 1\}. \quad (1.12)$$

Застосовуючи цю модель до НРК [18], мається на увазі, що на протязі усього часу t_A вісь ефективного потоку пострілів має співпадати з точкою прицілювання. Переносячи цю тезу на структуру БМ, це означає, що лінія прицілювання має зберігати своє первинне положення відносно осі каналу зброї за час t_A в умовах динамічних навантажень на приціл, обумовлених рухом шасі і динамікою зброї, і в структурі БМ мають бути: телевізійна камера широкого поля зору для пошуку цілей, а також телевізійний і тепловізійний приціли для прицілювання. Для перевірки надійності прицільних систем необхідно здійснювати контроль стабільності положення лінії прицілювання БМ як в процесі виготовлення, так і при експлуатації за допомогою спеціально розробленої контрольно-виміральної апаратури [19].

1.2.2 Вимоги до апаратури контролю положення лінії прицілювання бойових модулів

Виходячи з призначення, до контрольно-виміральної апаратури висуваються такі загальні вимоги:

- спроможність матеріалізувати вісь каналу зброї БМ;
- одночасний контроль телевізійного і тепловізійного прицілів;

- здатність контролювати положення лінії прицілювання в діапазоні її можливих відхилень;
- універсальність - здатність контролювати БМ з різною базовою відстанню L прицілів від зброї;
- безпека персоналу і простота експлуатації.

У якості основної метрологічної характеристики апаратури контролю обґрунтовано приймається припустима похибка визначення положення лінії прицілювання, оскільки, як витікає з моделі функціонування зразків озброєння, стабільність в часі і точність її кутового положення прямо впливають на ймовірність перемоги однієї із протиборчих сторін. Відповідно до нормативних документів [20, 21] відхилення лінії прицілювання зброї високої купчастості, до якої відноситься зброя НРК, не повинне перевищувати 0,5 т.д., що відповідає 108". Відповідно до рекомендацій Міждержавної ради із стандартизації, метрології і сертифікації [22] межа похибки вимірів, що допускається та не призводить до помітних втрат або інших несприятливих наслідків, має становити (0,2 - 0,3) межі симетричного допуску на важливий вимірюваний параметр. Використовуючи наведену вище умову і беручи до уваги, що характеристики щодо положенням лінії прицілювання належать до категорії важливих, цю умову можна трансформувати на прицільну техніку таким чином: похибка засобу вимірювання, що допускається, не повинна перевищувати (0,2 - 0,3) від максимально припустимого відхилення положення лінії прицілювання контрольованого прицілу.

Таким чином, максимальне значення припустимої похибки апаратури контролю положення лінії прицілювання БМ не повинне перевищувати $27 \pm 5''$.

1.2.3 Апаратура контролю положення лінії прицілювання прицільно-пошукових систем, що існує

Теоретично, для контролю стабільності положення лінії прицілювання можна використовувати апаратуру, що контролює

положення лінії візування оптичних прицілів для стрілецької зброї: «лазерний патрон», лазерний прилад «холодного» пристрілювання, трубка «холодного» пристрілювання, ствольний коліматор [23], нульовий коліматор і оптико-електронні комплекси. Але нульовий коліматор не здатен матеріалізувати вісь каналу зброї і тому не придатний для контролю положення лінії прицілювання БМ. Проаналізуємо здатність решти апаратури контролювати стабільність положення лінії прицілювання БМ НРК з врахуванням вище наведених вимог.

«Лазерний патрон» (ЛПа) [24, 25] являє собою корпус у вигляді патрону, калібр якого відповідає калібру зброї БМ НРК, в якому розміщений лазер, промінь якого колінеарний осі циліндричної поверхні патрону та спрямований у простір віддаленого екрану (рис.1.3).



Рисунок 1.3 -
«Лазерний патрон»



Рисунок 1.4 - Лазерний
прилад «холодного»
пристрілювання

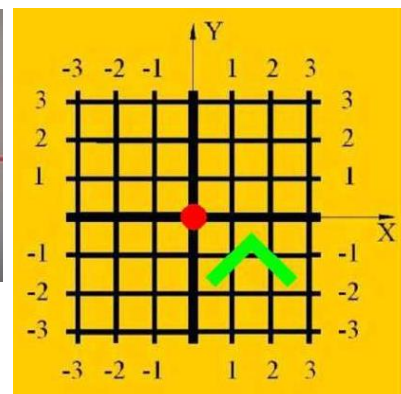


Рисунок 1.5 -
Зображення на
моніторі: екран,
прицільна марка у
вигляді косинця і
перша реперна мітка

Суть процесу контролю полягає у перевірці положення прицільної марки відносно центру лазерної плями, що відображає вісь ствола зброї на віддаленому екрані, на якому зображена координатна сітка. Для того, щоб мінімізувати вплив базової відстані L між прицілом і

зброєю на похибку вимірювання, дистанція D до екрану повинна визначатись залежністю

$$D \geq L / \delta_L, \quad (1.13)$$

де δ_L – припустима похибка, обумовлена впливом L .

Якщо в якості δ_L прийняти купчастість бою кулемету ПКМ (1,5 т.д.) і врахувати діапазон параметру L сучасних БМ НРК в межах (100 – 400) мм, то згідно (1.13) маємо $D \geq 267$ м.

Вочевидь, що в місцях експлуатації НРК, особливо в бойових умовах, складно знайти вільну ділянку 267 м, тому ЛП не прийнятний для контролю положення лінії прицілювання БМ.

З цієї точки зору перевагу слід віддати лазерному приладу «холодного» пристрілювання (ЛПХП) [26, 27]. ЛПХП випускається в двох модифікаціях. В першому варіанті ЛПХП представляє собою направляючу у вигляді стрижня – калібру, до якого прикріплено лазер [26], промінь якого колінеарний осі направляючої і спрямований в простір віддаленого екрану. Направляюча споряджена фторопластовими поясками для стабільності базування в каналі ствола зброї (рис. 1.4).

Суть процесу пристрілювання така ж сама, як і при застосуванні «лазерного патрону», ті самі й недоліки.

В другому варіанті ЛПХП споряджений горизонтальним рівнем у хвостовику направляючої [27]. Суть процесу вимірювання полягає у перевірці положення прицільної марки і лазерної плями відносно двох реперних точок в площині віддаленого екрану. Для цього екран встановлюється вертикально на заданій відстані від БМ. За допомогою рівня сам ствол зброї нівелюється, і вмикається лазер. На екрані позначається перша реперна мітка в місці перетину центра лазерного променя з екраном (рис. 1.5). Ця мітка відображає положення осі каналу ствола зброї і є початком системи координат зброї, в якій другою реперною міткою на екрані позначається розрахункове положення лінії прицілювання прицілу. На моніторі оператора, який проводить вимірювання, відображається друга

реперна мітка, прицільна марка і координатна сітка на екрані. В разі незбігу зображень мітки і марки оператор визначає розбіжність по вертикалі і горизонталі по координатній сітці.

Оскільки при такому методі пристрілювання врахована базова відстань між вхідною зіницею прицілу і зброєю, то виключається похибка δ_L і дистанція D до екрану визначається лише передньою межею різко відображаємого простору прицілу та можливістю інсталяції екрану якомога ближче до НРК. Для середніх значень характеристик телевізійних прицілів (об'єktiv 1,2/50 і електронне збільшення $\Gamma_{el} = 60$) ця межа становить 25 м. Ціна поділки на екрані дорівнює 1 т.д. (рис. 1.5), що відповідає 25мм на дистанції 25 м. Враховуючи діапазон параметру L , лінійні розміри екрану мають бути не менше 400 x 400 мм, або $1,4^\circ$ в кутовій мірі.

До основних джерел похибок, які впливають на похибку вимірювання з використанням ЛПХП, можна віднести:

- похибку δ_{POZ} розмітки екрану (позначення оптичної осі прицілу в системі координат екрану),
- похибку δ_{BAZ} базування ЛПХП в каналі ствола зброї,
- похибку δ_{BIZ} візування (суміщення систем координат зброї і розміченого екрану),
- а також похибку δ_{BIDL} зняття відліку, обумовлену дискретністю координатної сітки екрану.

Якщо при розмітці використовується металева лінійка з ціною поділу 1 мм, то похибка δ_{POZ} розмітки екрану визначається формулою:

$$\delta_{POZ} = 0,001 / 2D = 4''.$$

Похибка δ_{BAZ} базування ЛПХП типу ЛПП «Рубін» становить 54'' [26].

При оцінці похибки δ_{BIZ} візування можна виходити з наступного. Згідно з [25] кут розходження ЛПХП на базі гелій-неонового лазера становить 0,5 мрад і діаметр лазерної плями на екрані при $D = 25$ м сягає 6 мм.

Згідно [28] неточність суміщення неозброєним оком центру кола

малого діаметру і перехрестя становить 30". Виходячи з цього похибка візування $\delta_{ВІЗ}$, обумовлена неточністю суміщення лазерної плями і перехрестя екрану, приймається рівною $\delta_{ВІЗ} = 30''$.

Якщо врахувати, що оператор, який має досвід оптичних вимірів, здатний оцінювати величину (0,2 - 0,25) від найменшого інтервалу шкали вимірювального приладу, то похибка $\delta_{ВІДЛ}$ зняття відліку з використанням ЛПХП становитиме $(48 \pm 5)''$.

Приймаючи до уваги, що окремі похибки δ_i ($i = 4$) незалежні друг від друга, то сумарна похибка $\delta_{ЛПХП}$ вимірювання при використанні ЛПХП визначиться формулою $\delta_{ЛПХП} = (\sum \delta_i^2)^{1/2}$ і становить 78".

Таким чином, точність вимірювання із застосуванням ЛПХП не відповідає вимогам до апаратури контролю положення лінії прицілювання БМ. Окрім того, до недоліків ЛПХП слід віднести неможливість пристрілювання тепловізійного прицілу і небезпеку при роботі з лазерним випромінюванням.

Трубка «холодного» пристрілювання (ТХП) [29] містить телескопічну візирну систему, оптична вісь окуляру якої ортогональна оптичній осі об'єктиву, і направляючу у вигляді стрижня – калібру з рівнем (рис. 1.6). Візирна система призначена для наведення осі каналу ствола зброї на віддалений екран і містить сітку у вигляді перехрестя з поділами. Наприклад, сітка приладу ТХП-1 [29] має ціну поділки 6 кутових мінут при полі зору $7,3^\circ$ (рис. 1.7).



Рисунок 1. 6 - Зовнішній вигляд ТХП-1

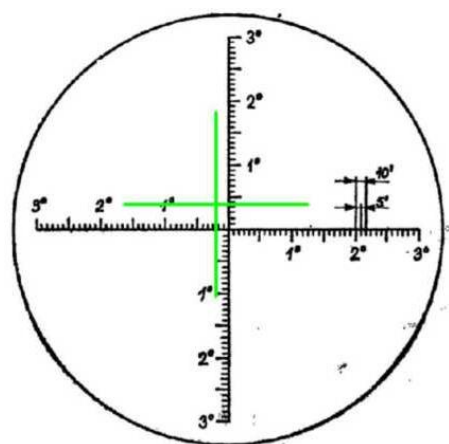


Рисунок 1.7 - Вид поля зору ТХП: друга реперна мітка на екрані має вигляд перехрестя

Суть процесу вимірювання така ж сама, як і при застосуванні ЛПХП і такі ж самі основні джерела похибок, які впливають на похибку вимірювання. Різниця лише в тому, що суміщення центрів перехресть сіток ТХП та екрану здійснюється озброєним оком і згідно критерію Штампфера [30] і похибка суміщення складає $(15'' - 50'')/I^x$, де I^x – збільшення ТХП. В разі використання ТХП-1, збільшення якої 5,6 крат, похибка $\delta_{ВІЗ}$ становить до 9''.

В цьому разі сумарна похибка $\delta_{ТХП}$ вимірювання при використанні ТХП визначиться формулою $\delta_{ТХП} = (\sum \delta_i^2)^{1/2}$ і становить 73''.

Таким чином, точність вимірювання із застосуванням ТХП також не відповідає вимогам до апаратури контролю положення лінії прицілювання БМ. Окрім того, до недоліків ТХП слід віднести неможливість пристрілювання тепловізійного прицілу.

Конструктивною особливістю ЛП, ЛПХП і ТХП є те, що їхня вихідна зіниця спрямована в простір цілей. Це передбачає обов'язкове використання віддаленого екрану, що не завжди можливо в умовах бойових дій. По-друге, всі ці прилади працюють у видимій області спектру, що унеможлиблює пристрілювання тепловізійних прицілів і потребує розроблення спеціальних екранів.

З цієї точки зору перевагу має ствольний коліматор, вихідна зіниця якого спрямована у бік прицілу.

Ствольний коліматор (СК) [31, 32] містить оптичний коліматор з масивним кронштейном, до якого кріпиться направляюча у вигляді стрижня – калібру (рис. 1.8). В фокальній площині об'єктива коліматора розміщена сітка з поділами. Наприклад, поле зору приладу 1П61 [32] становить 1° , а ціна поділки сітки - 1 т.д. (рис. 1.9). При використанні дзеркальної оптики в коліматорі СК здатен проводити контроль у видимій та інфрачервоній областях спектру.

Суть процесу вимірювання полягає у визначенні положення перехрестя марки прицілу відносно перехрестя сітки СК. Зображення марки і сітки відображаються на моніторі оператора. В разі незбігу

зображень сітки і марки оператор визначає розбіжність по вертикалі і горизонталі по сітці СК.



Рисунок 1.8 - Ствольний коліматор

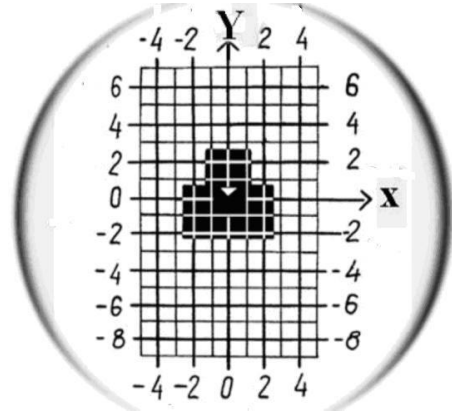


Рисунок 1.9 - Вид поля зору СК 1П61

У цьому разі похибка вимірювання визначається неоднозначністю установки СК в ствол і похибкою відліку з-за дискретності сітки СК.

Похибка $\delta_{\text{БАЗ}}$ базування СК типу 1П61 становить 54'' [32].

Якщо врахувати, що оператор, який має досвід оптичних вимірів, здатний оцінювати величину (0,2 - 0,25) від найменшого інтервалу шкали СК, то похибка $\delta_{\text{ВІДЛ}}$ зняття відліку з використанням СК становитиме $(48 \pm 5)''$.

В цьому разі сумарна похибка $\delta_{\text{СК}}$ вимірювання при використанні СК визначиться формулою $\delta_{\text{СК}} = (\sum \delta_i^2)^{1/2}$ і становить 72''.

Таким чином, точність вимірювання із застосуванням СК також не відповідає вимогам до апаратури контролю положення лінії прицілювання БМ. По-друге, як було зазначено вище, в БМ НРК базова відстань між прицілом і стволом зброї перевищує 100 мм. Це веде до того, що кронштейн СК має велику вагу, що ускладнює фіксацію коліматора напроти входної зіниці прицілу. По-третє, неможливе використання СК для лінійки НРК з різним діапазоном параметра L . Тобто прилад не є універсальним.

Як видно з цього аналізу, основний внесок в похибку вимірювання дає похибка базування стрижня, до якого кріпиться лазер або коліматор. На точність базування впливає нагар і температура ствола

зброї. З цієї точки зору безумовну перевагу має апаратура контролю на базі колімаційно-вимірювального блоку [33, 34].

Колімаційно-вимірювальний блок з просторово рознесеними колімаційним і вимірювальним каналами та лазером (КВБ-Л) [32] містить просторово рознесені на відстань L колімаційний 1 і вимірювальний 2 канали, що мають власні об'єктиви з колінеарними оптичними осями, та лазер 3, укріплений на кронштейні, який однозначно базується на стволі 4 зброї НРК (рис. 1.10). У фокальній площині об'єктиву 5 колімаційного каналу 1 встановлена сітка 6, оснащена освітлювальною системою, а у фокальній площині об'єктиву 7 вимірювального каналу 2 - позиційно-чутливий фотоприймальний пристрій 8. Для однозначного базування лазера 3 на зброї, вісь випромінювання якого відображає вісь каналу ствола 4, використовується V- подібна направляюча із противідкидним елементом у вигляді циліндричного стрижня.

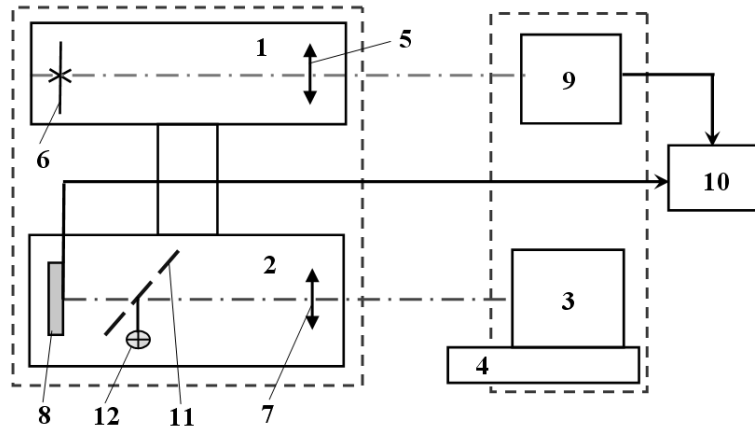


Рисунок 1.10 - Схема взаємодії КВБ з БМ (позначення дано в тексті)

Суть технологічного процесу вимірювання полягає у суміщенні лазерної плями з центром фотоприймального пристрою 8 і визначенні положення марки прицілу 9 відносно перехрестя сітки 6 колімаційного каналу 1. Зображення прицільної марки і сітки відображаються на моніторі 10 оператора (рис. 1.10). В разі незбігу

зображень сітки і марки оператор визначає розбіжність по вертикалі і горизонталі по сітці 6 колімаційного каналу 1.

При такому технологічному процесі можна сформулювати перелік окремих помилок, що викликають похибку визначення положення лінії прицілювання: похибка $\delta_{БАЗ}$ положення осі лазерного променя внаслідок неоднозначності базування лазера 3 на зброї 4; похибка $\delta_{ЛП}$ визначення координат центру лазерної плями в площині фотоприймального пристрою 8, обумовлена його дискретністю; похибка $\delta_{ВЦДЛ}$ зняття відліку по сітці 6 колімаційного каналу 1.

За даними досліджень [35] $\delta_{БАЗ} = 1,5''$. При використанні в якості фотоприймального пристрою $(\frac{1}{4})''$ ПЗЗ-матриці з розміром пікселя 2 мкм і об'єктиву 8 з фокусом 500 мм $\delta_{ЛП} = 1''$. При полі зору колімаційного каналу $1,8^\circ$ і ціні поділки сітки $30''$ $\delta_{ВЦДЛ} = 7,5''$.

В цьому разі сумарна похибка $\delta_{КВБ-Л}$ вимірювання при використанні КВБ-Л визначиться формулою $\delta_{КВБ-Л} = (\sum \delta_i^2)^{1/2}$ і становить $7,7''$.

Розглянемо колімаційно-вимірювальний блок з просторово рознесеними колімаційним і вимірювальним каналами та дзеркалом (КВБ-Д) [33]. Структурна схема КВБ-Д відповідає структурній схемі КВБ-Л з тією різницею, що замість лазера на зброї встановлюється дзеркало 3, нормаль якого відображає вісь каналу ствола зброї 4, а між об'єктивом 2 і фотоприймальним пристроєм 8 вимірювального каналу 2 встановлено світлоподільник 11 (на рис. 1.10 показано пунктиром) і точкове джерело випромінювання 12. Таким чином, система «вимірювальний канал – дзеркало» є по-суті автоколімаційним каналом.

Суть технологічного процесу вимірювання полягає у суміщенні відбитого дзеркалом 3 зображення точкового джерела випромінювання 12 з центром фотоприймального пристрою 8 і визначенні положення перехрестя марки прицілу 9 відносно перехрестя сітки 6 колімаційного каналу 1. Зображення марки і сітки відображаються на моніторі 10 оператора. В разі незбігу зображень

сітки і марки оператор визначає розбіжність по вертикалі і горизонталі по сітці 6 колімаційного каналу 1.

При такому технологічному процесі можна сформулювати перелік окремих помилок, що викликають похибку визначення положення лінії прицілювання: похибка $\delta_{БАЗ}$ положення нормалі дзеркала 3 внаслідок неоднозначності його базування на зброї; похибка $\delta_{ДЗ}$ визначення координат центру зображення точкового джерела в площині фотоприймального пристрою, обумовлена його дискретністю; похибка $\delta_{ВДЛ}$ зняття відліку по сітці колімаційного каналу.

За даними досліджень [35] $\delta_{БАЗ} = 3''$. При використанні в якості приймача випромінювання $(1/4)''$ ПЗЗ-матриці з розміром пікселя 2 мкм і об'єктиву 8 з фокусом 500 мм $\delta_{ДЗ} = 0,5''$ в режимі автоколімації. При полі зору колімаційного каналу $1,8^\circ$ і ціні поділки сітки $30''$ $\delta_{ВДЛ} = 7,5''$.

В цьому разі сумарна похибка $\delta_{КВБ-Д}$ вимірювання при використанні КВБ-Д визначиться формулою $\delta_{КВБ-Д} = (\sum \delta_i^2)^{1/2}$ і становить $8,1''$.

Таким чином, точність вимірювання із застосуванням КВБ дозволяє використовувати цю апаратуру для контролю положення лінії прицілювання БМ в місцях експлуатації НРК, але без суттєвого метрологічного запасу. При використанні дзеркальної оптики в колімаційному каналі ця апаратура здатна проводити контроль у видимій та інфрачервоній областях спектру. До недоліків розглянутих КВБ слід віднести небезпеку при роботі з лазерним випромінюванням в разі використання КВБ-Л. По-друге, як було зазначено вище, в БМ НРК базова відстань між прицілом і стволом зброї перевищує 100 мм. Це веде до того, що кронштейн між колімаційним і вимірювальним каналами має велику вагу, що ускладнює фіксацію колімаційного каналу напроти вхідної зіниці прицілу. По-третє, прилади КВБ не є універсальними.

1.3 Експертне оцінювання та побудова пріоритетного ряду апаратури контролю положення лінії прицілювання прицільно-пошукових систем

Як видно з проведеного аналізу відомих систем і апаратури контролю засобів пристрілювання, кожна методика має свої переваги і недоліки при контролі лінії прицілювання БМ НРК. Тому доцільно побудувати пріоритетний ряд (рейтинг) апаратури за відомими методиками порівняльного аналізу [36, 37] і обрати перспективний напрямок вдосконалення.

В таблиці 1.1 дано перелік характеристик апаратури контролю, які порівнюються згідно до розглянутих в підрозділі 1.2.2 вимог, та їхні вагові коефіцієнти α_j , отримані експертним шляхом [38].

Таблиця 1.1

Вагові коефіцієнти характеристик апаратури контролю БМ НРК

Характеристика	Точність вимірювання	Діапазон вимірювання	Контроль у видимому та ІЧ спектрі	Безпека експлуатації	Універсальність
Ваговий коеф., α_j	0,32	0,14	0,16	0,16	0,22

В таблиці 1.2 наведено значення характеристик X_{ij} (якісні та кількісні) та їхні нормовані значення p_{ij} в знаменнику. Нормування проводилось за формулами, наведеними в роботі [38] в залежності від того, яке значення характеристики більш вигідне – більше чи менше:

$$p_{ij} = X_{ij} / X_{\max} \text{ або } p_{ij} = X_{\min} / X_{ij}.$$

Узагальнений показник якості (рейтинг R) апаратури визначався за формулою [38]:

$$R = \sum_{j=1}^M \alpha_j p_{ij}, \text{ де } M = 5.$$

Результати розрахунку рейтингу наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Значення характеристик апаратури та її узагальнений показник
якості (рейтинг)

Хар-ка	Точність вимірю- вання, сек	Діапазон вимірю- вання, град	Контроль у видимій та ІЧ областях спектру	Безпека експлу- атації	Універ- сальність	Рейтинг, <i>R</i>
ЛПХП	78/0,1	1,4/0,19	ні/0	ні/0	так/1	0,279
ТХП	73/0,11	7,3/1	ні/0	так/1	так/1	0,555
СК	72/0,11	1/0,14	так/1	так/1	ні/0	0,375
КВБ-Л	7,7/1	1,8/0,25	так/1	ні/0	ні/0	0,515
КВБ-Д	8,1/0,95	1,8/0,25	так/1	так/1	ні/0	0,659

Як видно з проведених розрахунків, найбільш високий рейтинг має КВБ-Д. Тому саме цей пристрій слід брати за основу розробки перспективних засобів контролю положення лінії прицілювання БМ НРК з метою усунення недоліків існуючої апаратури.

Висновки

1. Конструктивне виконання системи технічного зору БМ, що існує, веде до складності контролю систем при експлуатації, збільшенню габаритів самого БМ і незручності сприйняття інформації на робочому місці оператора-стрільця.
2. На базі уточненої моделі функціонування зразків озброєння протиборчих сторін за участю НРК встановлено зв'язок між ймовірністю перемоги однієї із сторін і характеристиками прицільно-пошукової системи НРК та фоно-цільовою обстановкою в місцях протистояння.
3. З уточненої моделі витікає, що ефективність потоку пострілів залежить від стабільності положення лінії прицілювання відносно осі каналу ствола зброї упродовж часу виконання бойової задачі, оптичних характеристик прицільно-пошукової системи та фоно-цільової обстановки.

4. Для забезпечення стабільності лінії прицілювання необхідно здійснювати контроль її положення як в процесі виготовлення, так і при експлуатації за допомогою контрольно-вимірювальної апаратури.
5. Припустима похибка контрольно-вимірювальної апаратури не повинна перевищувати $27 \pm 5''$.
6. Контрольно-вимірювальна апаратура, що існує: «лазерний патрон», лазерний прилад «холодного» пристрілювання, трубка «холодного» пристрілювання, ствольний коліматор, не забезпечують необхідну точність вимірювання; оптико-електронні комплекси на базі просторово рознесених колімаційного та вимірювального каналів забезпечують необхідну точність вимірювання, але без суттєвого метрологічного запасу і мають ряд недоліків.
7. Заставлення контрольно-вимірювальної апаратури, що існує, за методиками, розробленими в ЦНДІ ОВТ ЗСУ, показало - найвищий рейтинг має колімаційно-вимірювальний блок з просторово рознесеними колімаційним і вимірювальним каналами та дзеркалом, що визначає вісь каналу ствола зброї. Недоліком цієї апаратури є те, що кронштейн між колімаційним і вимірювальним каналами має велику вагу, що ускладнює фіксацію колімаційного каналу напроти вхідної зіниці прицілу, окрім того прилад не забезпечує контроль бойових модулів з різними базами між прицілами і зброєю.

Література до розділу 1

1. The Re-Emergence of Unmanned Ground Vehicles in Army Modernisation Efforts. [Online]. Available: <https://finabel.org/wp-content/uploads/2022/08/IF-22.08-new.pdf>
2. Про затвердження Порядку проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки. Постанова КМУ від 17 лютого 2021 р. № 159. Електронний ресурс <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text>. Дата звернення 20.10.2022.

3. *Мельник О.Д.* Загальні тенденції розвитку озброєння та військової техніки / Нор П.І., Чепков І.Б., Мельник О.Д. // Науковий твір. Свідोцтво Державної служби інтелектуальної власності України про реєстрацію авторського права на твір № 60828 від 27.07.2015 р.
4. *Рябець О.М.* Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: основні підсумки та завдання на майбутнє / Рябець О.М., Борохвостов В.К. // Озброєння та військова техніка, №4, 2016. – С.75-81.
5. *Гусляков О.М.* Критичні технології для створення наземних робототехнічних комплексів важкого та середнього класу / Гусляков О.М., Довгополий А.С., Чепков І.Б. // Озброєння та військова техніка, №1(25), 2020. –С.24-34. DOI 1034169/2414-0651.2019.3(23).16-25.
6. *Чепков І.Б.* Концептуальні засади створення вітчизняних ударно-розвідувальних наземних роботизованих комплексів важкого класу. / Чепков І.Б., Довгополий А.С., Гусляков О.М. // Озброєння та військова техніка, №3(23), 2019. –С.16-25. DOI 1034169/2414-0651.2020.1(25).24-34.
7. *Мосиенко С.А.* Концепция построения наземного робототехнического ударного комплекса / Мосиенко С.А., Лохтин В.И.// М.: Самполиграфист, 2014. – 124 с.
8. *Задорожный И.С.* Состав и структура оптико-электронных комплексов подвижных объектов / Задорожный И.С. Задорожный В.И., Задорожный Ю.И. // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. Зб. наук. праць. 2008. Вип. 35. – С.5-15.
9. *Круковский-Синевич К.Б.* Вероятностная модель огневого противоборства сторон / Круковский-Синевич К.Б., Гурнович А.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение. - 2003. – Вып. № 5.– С. 14 - 15.
10. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов/ Мирошников М.М. // Л-д: «Машиностроение», Ленинградское отделение, 1977. – 600 с.

11. Чиж І.Г. Автоматизована об'єктивна рефрактометрія ока з визначенням обсягу псевдоакомодації / Чиж І.Г., Сенаторов В.М., Голембовський О.О. //Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.–119 с.
12. Гусяков О.М. Методика комплексного обґрунтування вимог до спеціального обладнання робототехнічних комплексів розмінування. (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук) / Гусяков О.М. // Київ, ЦНДІ ОБТ ЗСУ, 2019. – 20 с.
13. Olexander Melnyk. Influence of human factor on combat effectiveness of small arms firing operations with optical sight/ Olexander Melnyk, Volodymyr Senatorov, Mykola Bilokur, etc. // Scientific Bulletin of Military Institute of Armament Technology “Issues of Armament Technology” (Poland), vol. 153, No 1/2020, p. 55-64. DOI 10.5604/30010014.2711.
14. Прицелы оптические и электронно-оптические для стрелкового оружия. Специальные технические требования. Методы испытания: ПР 78.01.00202009: утв. МВД РФ 25.12.2009. - 120 с.
15. Наставление по стрелковому делу. Основы стрельбы из стрелкового оружия; 7,62-мм модернизированный автомат Калашникова (АКМ и АКМС); 7-62мм ручной пулемет Калашникова (РПК и РПКС); 7-62 мм пулемет Калашникова (ПК, ПКС, ПКВ и ПКТ); 9-мм пистолет Макарова (ПМ); Ручные гранаты. – Изд. 3-е. - М.: Воениздат, 1985. – 640 с.
16. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации: РМГ 63-2003: утв. Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 05.12.2003.
17. Senatorov V. Boresighting of unmanned weapon platforms / Senatorov V., Husliakov O, Melnyk O. // Scientific Bulletin of Military Institute of Armament Technology “Issues of Armament Technology” (Poland), vol. 154, No 2,3/2020, p. 63-73. DOI 10.5604/01.3001.0014.4882.

18. Laser bore sight. Патент США №5787631А, МПК F41G 33/02.
19. Патроны холодной пристрелки – «Прицел». Электронный ресурс <https://pricel.in.ua/hunt-and-weapons/boresight-weapons>. Дата звернения 22.04.2021.
20. Лазерный прибор холодной пристрелки ЭСТ ЛПХП-Р. Электронный ресурс https://opticdevices.ru/product_660.html. Дата звернения 22.04.2021.
21. *Бутримов И.С.* О возможностях применения лазерного пристрелочного устройства «Рубин» ЛПУ-762 в задачах выверки оптических прицелов боевого стрелкового оружия / И.С. Бутримов, А.В. Шеина // I Междунар. форум «Лазерполитех-2005» - «Технологии и средства обеспечения огневой подготовки»: Сб. материалов. - Новосибирск: ООО НТЦ «Лазерные технологии». - 2006. - С. 43 - 45.
22. *Афанасьев В.А.* Оптические измерения / Афанасьев В.А.// М., «Недра». 1981 – 232 с.
23. Трубки холодной пристрелки ТХП, ТХП-1. Электронный ресурс httpsp://hpotopribor.ck.ua/products/defense/prylady_control/thp-1. Дата звернения 22.04.2021.
24. *Ананьев И.Н.* Основы устройства прицелов /Ананьев И.Н. // М.: Военное издательство министерства вооруженных сил Союза ССР, 1947.- 440 с.
25. Устройство для «холодной» пристрелки BSA GUNS BS 30 в кейсе. Электронный ресурс <httpsp://activmarket.com.ua/catalog/oruzhie-tyuning/xolodnaya-prostrelka/ustroystvo-dlya-xolodnoy-pristrelki-bsa-guns-bs30-v-kejse.html>. Дата звернения 22.04.2021.
26. Электронный ресурс www.ak-info.ru/joomba/index.php/uses/10-metodik/48-1p61use. Дата звернения 22.04.2021.
27. Устройство для контроля положения линии визирования прицелов на стрелковом оружии: пат. 2535584 Рос. Федерация : МПК F41G 1/54, G02B 23/00; Бюл. № 35, 2014.
28. Устройство для контроля положения линии визирования

прицелов на стрелковом оружии: пат. 2536570 Рос. Федерация: МПК F41G 1/54, G02B 23/00; Бюл. № 36, 2014.

29. *Бутримов И.С.* Разработка и исследование оптико-электронного комплекса для контроля положения линии визирования прицелов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бутримов И.С. // ФГУ «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», Новосибирск, 2016. 20 с.
30. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. Пер с англ. / Саати Т. // М.: «Радио и связь», 1993. – 315 с.
31. *Дочкін А.Г.* Порівняльна оцінка зразків артилерійського озброєння за критерієм «ефективність-вартість» / Дочкін А.Г., Лапицький С.В., Чепков І.Б. // Артиллерийское и стрелковое вооружение. - Київ: НТЦ АСО, 2003. – № 7.– с. 52 - 55.
32. *Мельник О.Д.* Моделювання процесів функціонування зразків озброєння з врахуванням фоно-цільової обстановки і оптичних характеристик прицілів / В.М. Сенаторов, О.Д. Мельник // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи, Одеса, Військова академія, 12-16 вересня 2019 р., с. 274.
33. *Мельник О.Д.* Моделювання процесів функціонування зразків озброєння з врахуванням часу виявлення цілі / А.В. Гурнович, В.М. Сенаторов, О.Д. Мельник // Збірник тез доповідей науково-практичного семінару «Проблеми застосування систем імітаційного моделювання у Збройних Силах України, Київ, Національний університет оборони імені Івана Черняховського 29 травня 2019р., с. 16-19.
34. *Мельник О.Д.* Модель функціонування зразків стрілецького озброєння в ході бойових дій / А.В.Гурнович, В.М.Сенаторов, О.Д.Мельник та ін. // Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Актуальні проблеми підготовки, застосування ЗСУ,

управління ними, їх оперативного та логістичного забезпечення», Київ, ЦНДІ ЗСУ, 4 листопада 2020 р., с. 432-434.

35. *Мельник О.Д.* Результати моделювання функціонування зразків стрілецького озброєння в ході бойових дій / А.В. Гурнович, В.М. Сенаторов, О.Д. Мельник та ін. // Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Актуальні проблеми підготовки, застосування ЗСУ, управління ними, їх оперативного та логістичного забезпечення», Київ, ЦНДІ ЗСУ, 4 листопада 2020 р., с. 435-437.
36. *Мельник О.Д.* Моделювання процесів функціонування озброєння з врахуванням оптичних характеристик засобів прицілювання / О.Д.Мельник // Збірник наукових праць ЦНДІ ОВТ ЗСУ. - №3 (78)/2020. – с. 104-111.
37. *Мельник О.Д.* Надійність озброєння – запорука воєнної безпеки держави. «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки». /Мельник О.Д. // Тези доповідей на IX Міжнародній науково-практичній конференції. ЦНДІ ОВТ ЗСУ, Київ, 15-17 червня 2021 р., с. 47-48.
38. *Мельник О.Д.* Методика комплексної порівняльної оцінки зразків ОВТ / П.І.Нор, О.Д.Мельник // Збірник тез доповідей міжгалузевої науково-практичної конференції «Проблеми якості оборонної продукції: організаційні, технічні та фінансово-економічні аспекти», Київ, Національний університет оборони імені Івана Черняхівського, 22-23 травня 2019р., с. 66-67.
39. *Мельник О.Д.* Моделювання систем дистанційного управління бойових роботів / О.Д.Мельник // Збірник тез доповідей науково-практичного семінару «Проблеми застосування систем імітаційного моделювання у Збройних Силах України, Київ, Національний університет оборони імені Івана Черняхівського 29 травня 2019 р., с. 54.

2 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ - ПОШУКОВИХ СИСТЕМ БОЙОВИХ МОДУЛІВ

ППС наземного роботизованого комплексу НРК відноситься до особливого класу систем відображення інформації. Це обумовлено особливостями взаємодії оператора з телевізійними системами, якими оснащено бойовий модуль НРК і робоче місце оператора. Практично в усіх операціях (пошук, виявлення та розпізнання цілі і прицілювання), головним чином і притому найбільш повно і якісно, використовується зір людини – найбільш чутливий інформаційно-місткий і швидкодіючий канал сприйняття оточуючого простору. Як правило, оператор НРК візуально взаємодіє з кінцевим пристроєм телевізійних систем – виділеним дисплеєм – елементом системи відображення інформації. На ньому відображається простір цілей, сама ціль, прицільна марка і допоміжна інформація, наприклад, кутове положення бойового модуля відносно осі симетрії НРК, дані зовнішнобазового далекоміру.

Тактичними характеристиками виявлення та розпізнавання (ідентифікація) цілей є імовірність і витрачений час, а найважливішими факторами, які впливають на вирішення цієї задачі, є:

- якість зображення на віддаленому дисплеї оператора;
- обсяг інформації, який відомий оператору НРК і дозволяє йому виділити об'єкт на фоні оточуючого простору (база даних цілей);
- ступінь підготовленості оператора, який керує НРК і веде пошук цілей на дисплеї;
- тактико-технічні характеристики ППС (дальність спостереження, кут огляду, роздільна здатність).

Успіхи сучасної мікроелектроніки, цифрових приймачів оптичного зображення і матричних систем відображення інформації

привели до ситуації, коли при пошуку в нормальних погодних умовах обмежуючим фактором становляться характеристики візуальної системи оператора. Тому при визначенні тактико-технічних характеристик ППС необхідно брати до уваги всі перелічені фактори: базу даних цілей, характеристики атмосфери і візуальної системи оператора та умови спостереження.

Саме тому характеристики зору людини повинні бути головуючими при проектуванні телевізійних систем НРК, в першу чергу при визначенні параметрів системи відображення інформації.

2.1 Організація робочого місця оператора

Згідно з теоретичними основами оптико-електронних приладів [1], при пошуку цілі в межах широкого поля, спостерігач в процесі тренування починає діяти за визначеною системою. Він мислено ділить його на зони, в межах яких здійснює випадковий пошук, а перехід від однієї зони до іншої відбувається упорядковано за рядками чи стовбцями. Аби виключити втрати часу на переведення погляду з однієї зони на іншу, при проектуванні робочого місця оператора НРК необхідно враховувати поле зору ока, в межах якого досягається задовільна якість зображення. За даними [2] це поле становить 30° по вертикалі і 40° – по горизонталі.

Тоді, при відображенні інформації на віддаленому дисплеї стандартного формату 3:4, яка спостерігається з відстані найкращого зору ока людини (250 мм), розміри дисплею не повинні перевищувати $b_m = 182$ мм по горизонталі і $h_m = 134$ мм по вертикалі (діагональ дисплею 226 мм = 8,9").

Якщо врахувати, що роздільна здатність людського ока сягає в середньому $0,29$ мрад [3, 4], то розмір пікселя дисплею має складати: $a_m \leq 250 \cdot 0,29 \cdot 10^{-3} \leq 0,0725$ мм $\leq 72,5$ мкм.

З врахуванням цього розмірність матриці дисплею складе: $N_m = b_m h_m / a_m^2 \approx 4,6$ мегапікселів. Сучасний ринок пропонує достатньо

широку номенклатуру плоских відображаючи пристроїв [5], і вибір конкретного типу пристрою залишається за проектантом.

На турелі сучасного НРК встановлюють, як мінімум, дві телевізійні камери: камеру широкого поля зору (КШПЗ), за допомогою якої здійснюють пошук цілі в оточуючому просторі, і камеру вузького поля зору (КВПЗ), за допомогою якої розпізнають ціль і здійснюють прицілювання.

Перспективним напрямом створення прицільно - пошукової системи НРК вважається впровадження системи доповненої реальності, тобто виведення зображення телевізійних камер на нашоломний індикатор (НШІ) [6]. Особливо це доцільно, якщо оператор змушений переключати свій зір на органи управління НРК. В цьому разі інформація, що відображена на НШІ, зберігається в полі зору оператора при довільному положенні його голови.

Перевага НШІ перед віддаленим дисплеєм полягає також в тому, що при комплексуванні з системою позиціонування голови оператора інформація буде відповідати реальному напрямку спостереження в заданих координатах і зберігатиметься перед очима оператора при будь-якому довільному положенні його голови. Окрім того вивільнюється місце на приладній панелі робочого місця оператора, оскільки виключається ряд бортових систем, функцію яких виконуватиме НШІ.

НШІ відноситься до особливого класу систем доповненої реальності індивідуального користування. Це пояснюється, в основному, задачами, що вирішуються за її допомогою, та ергономічними вимогами, пов'язаними з її розміщенням на захисному шоломі/голові оператора. Основні задачі НШІ - відображати в полі зору оператора растрову відеоінформацію від оглядових і прицільних телевізійних/тепловізійних систем для пошуку, виявлення та розпізнавання цілей, а також символну/графічну інформацію про стан систем НРК, прицільні мітки і таке інше. Елементи конструкції НШІ не повинні обмежувати оператору огляд оточуючого простору (в

т.ч. приладної панелі НРК) і забезпечувати безпеку експлуатації. Поле зору нашоломного індикатора доцільно обмежувати зоною, в межах якої досягається задовільна якість зображення ока людини [2].

На думку фахівців проблематика конструювання НШІ для НРК пов'язана із:

- сприйняттям оператором НРК колімованого зображення;
- вибором формувача зображення;
- особливостями габаритного і абераційного розрахунків обраної оптичної схеми;
- компоновкою індикатора на захисному шоломі/голові оператора.

2.1.1 Використання системи доповненої реальності

Оскільки оператор НРК знаходиться у замкненому просторі, тому сприйняття ним колімованого зображення має бути досліджене окремо.

Глибина чіткого бачення ока людини без акомодатії залежить від діаметра зіниці $D_{зін}$ ока. Зокрема, при яскравості всередині транспортного засобу не менше 135 кд/м^2 діаметр зіниці $D_{зін} = 4 \text{ мм}$ [7]. При цьому положення передньої $P_{пер}$ і задньої $P_{зад}$ межі простору, що чітко спостерігається на індикаторі, визначається відомими залежностями [8]:

$$P_{пер} = D_{зін} f' P_{нав} / (D_{зін} f' + P_{нав} d_{дон}), \quad (2.1)$$

$$P_{зад} = D_{зін} f' P_{нав} / (D_{зін} f' - P_{нав} d_{дон}), \quad (2.2)$$

де: $P_{нав}$ – віддалення площини, на яку акомодоване око, $f' = 22,8 \text{ мм}$ – усереднене значення фокусної відстані ока людини, а $d_{дон}$ – припустимий кружок нерізкості на сітківці ока: $d_{дон} \approx 0,006 \text{ мм}$ [3, 9].

При колімації $P_{зад} \rightarrow \infty$, і підстановка цього значення в (2.2) при $D_{зін} = 4 \text{ мм}$ дає результат $P_{нав} = 15,2 \text{ м}$, а підстановка останнього значення в (2.1) визначає $P_{пер} = 7,6 \text{ м}$. Це означає, що оператор

транспортного засобу (укриття) не може одночасно чітко (без переакомодації очей) бачити колімоване зображення, що сформоване НШІ, та обстановку всередині транспортного засобу, в т.ч. зображення на приладній панелі. Звідси також витікає, що індикатор повинен мати в своєму складі сумуючий оптичний елемент (наприклад, напівпрозоре дзеркало), аби оператор мав змогу бачити одним оком колімоване зображення, сформоване індикатором, або обома очима бачити обстановку всередині транспортного засобу, з якого здійснюється управління НРК, при акомодатії ока на кінцеву відстань.

При відображенні інформації, сформованої на НШІ на кінцевій відстані, $P_{пер}$ має бути не менше відстані найкращого зору людини, тобто $P_{пер} \geq 250$ мм. Підстановка цього значення в (2.1) при $D_{зін} = 4$ мм дає результат $P_{нав} = 254$ мм, а підстановка останнього значення в (2.2) визначає $P_{зад} = 258$ мм. Це показує, що оператор транспортного засобу не може одночасно чітко (без переакомодації очей) бачити зображення, сформоване індикатором на відстані найкращого зору, та обстановку всередині транспортного засобу.

При відображенні інформації, сформованої на НШІ на проміжну відстань, при якій оператор чітко бачить приладну панель, $P_{нав} \approx 1000$ мм. Підстановка цього значення в (2.1) і (2.2) визначає межі чіткого спостереження $P_{пер} = 0,94$ м, $P_{зад} = 1,07$ м. Тобто глибина чіткого бачення оператора становить лише 130 мм. Це означає, що оператор транспортного засобу може одночасно чітко (без переакомодації очей) бачити зображення, сформоване індикатором і приладну дошку, але не може бачити без переакомодації очей обстановку всередині транспортного засобу, віддалену на відстань більше 1,07 м.

Проблему сприйняття колімованого зображення всередині транспортного засобу можна вирішити лише натурним експериментом із залученням досвідчених операторів НРК. В той же час, експерименти, проведені фахівцями фірми Limpid Armor,

показують перспективність використання системи доповненої реальності.

2.1.2 Вибір формувача зображення для нашоломного індикатора

До кінця минулого століття єдиним можливим формувачем зображення для НШІ були мініатюрні монохромні електронно-променеві трубки (ЕПТ, діаметр (11-22) мм, довжина (75-110) мм). Однак ЕПТ мали ряд суттєвих недоліків, які стримували розвиток НШІ. Окрім великих габаритів і маси для них характерне велике енергоспоживання і, відповідно, велике виділення тепла; також необхідність підвода до захисного шолома високої напруги ((8-13) кВ), що створювало небезпеку для оператора. Велика довжина ЕПТ змушувала ускладнювати оптичну схему для раціональної компоновки індикатора на захисному шоломі [10].

В 90-ті роки минулого століття з'явилися серійні технології, що дозволили створювати плоскі мініатюрні дисплеї, які не мали недоліків властивих ЕПТ. Найбільш прийнятними кандидатами на заміну ЕПТ в НШІ вважаються рідинно-кристалічні (LCD), електролюмінісцентні і плазмові дисплеї (PDP). Свого часу за кордоном були створені монохромні жовті електролюмінісцентні дисплеї на активних матрицях з діагоналлю 12 мм, рідинно-кристалічні індикатори з діагоналлю понад 25 мм, а також монохромні зелені дисплеї на основі органічних світловипромінюючих діодів (OLED). Найбільшого успіху досягла японська фірма JVC, рідинно-кристалічна матриця 8K4K D-ILA якої має розмір пікселя 4,8 мкм і діагональ 44,6 мм [11]. В той же час з'явилися і НШІ на базі рідинно-кристалічних панелей. Для рідинно-кристалічних індикаторів основною проблемою в той час було створення підсвічування з високою яскравістю до 6000 кд/м², терміном служби понад 30000 годин, високим контрастом зображення і забезпечення роботи при низьких температурах.

З цієї точки зору безумовну перевагу мають дисплеї на базі органічних світловипромінюючих діодів [6, 12]. До їхніх переваг над рідинно-кристалічними слід віднести: відсутність підсвічування, завдяки чому вони мають меншу товщину; великі кути випромінювання, що дозволяє використовувати світлосильний об'єктив; відсутність інерційності; висока контрастність зображення; висока яскравість (понад 10^5 кд/м²); широкий температурний діапазон експлуатації (-40 – +70)°C.

Очікується, що на заміну OLED дисплеїв прийдуть в найближчий час TMOS дисплеї (Time-Multiplexed Optical Shutter - з оптичним затвором часового мультиплексування) [13]. Ця технологія використовує інерційність сітківки людського ока. Також ведуться розробки TFT (Thin-Film Transistor) дисплеїв, що працюють за технологією органічних тонкоплівкових транзисторів [14]. За оцінками фахівців це приведе до зниження вартості формувачів зображення [13, 14].

Як витікає з цього короткого аналізу формувачів зображення, кожний з типів дисплеїв має свої переваги і недоліки. Тому при виборі дисплея для НШІ необхідно враховувати вимоги до системи індикації. На наш погляд, для НШІ найбільш прийнятні OLED дисплеї стандартного формату 3:4, виробництво яких в Україні може налагодити ІФН ім. В.Є. Лошкарьова, враховуючи досвід розробки електролюмінісцентних індикаторів [6].

2.2 Розрахунок оптичної схеми

Оптична схема НШІ може будуватись на базі рефракторної, рефлекторної або голографічної оптики. Принциповим моментом при проектуванні оптичної схеми НШІ є відстань l_1 від ока до найближчої оптичної деталі індикатора. Враховуючи можливість використання оператором протигазу, ця відстань має бути не менша, ніж 20 мм (саме таке значення відстані вихідної зіниці мають танкові приціли). Друге обмеження пов'язане з полем зору індикатора. Як було

відмічено вище, воно не має перевищувати $2\beta \leq 50^\circ$ (40° горизонтальна складова $2\beta_x$ і 30° вертикальна складова $2\beta_y$ поля зору при стандартному форматі формувача зображення).

2.2.1 Габаритний розрахунок рефракторної оптичної схеми індикатору

Рефрактора оптична схема НШІ (рис. 2.1) будується на базі лінзового об'єктиву 1, в фокальній площині якого розміщено формувач зображення 2 [15]. Для суміщення зображення, створеного формувачем 2, з оточуючим простором використовується напівпрозоре дзеркало 3, яке утворює з лінією візування кут 45° . Для зручності компоновки елементів НШІ на шоломі/голові оператора в оптичну систему може бути введено додаткове дзеркало 4 (на рис. 2.1 умовно повернуте разом із формувачем зображення на 90° навколо вертикальної оптичної осі).

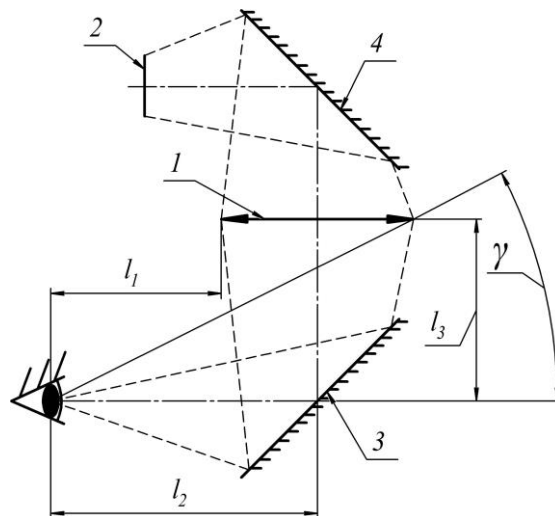


Рисунок 2.1 - Рефрактора оптична схемі НШІ: 1- об'єктив, 2 – формувач зображення, 3 – напівпрозоре дзеркало, 4 – додаткове дзеркало

Для того, щоб якість растрового зображення, сформованого оптичною схемою, відповідала реальним об'єктам навколишнього середовища, об'єктив 1 повинен задовольняти критерію добротності C_D Д.С. Волосова [16]:

$$C_D = 0,24 \pm 0,02 \geq 0,1 A f'^{1/2} \operatorname{tg} \beta, \quad (2.3)$$

де A – відносний отвір об'єктива 1, а f' – його фокусна відстань.

Для мінімізації габаритів НШІ в ній доцільно використовувати світлосильний об'єктив 1 з відносним отвором 1:1, тобто $f' \approx D$, де D – діаметр вихідної зіниці об'єктива.

Підставляючи в формулу (2.3) усі відомі значення, знаходимо $f' \geq 58$ мм. Габарити прямокутної апертури об'єктиву 1 не мають перевищувати 44,6 x 34,8 мм. Габарити робочої площадки формувача зображення 2 при цьому становлять 29,3 x 22 мм. При розмірі пікселя 4,8 мкм роздільна здатність індикатора становить 0,08 мрад (17").

При таких габаритах об'єктиву мінімальна відстань $l_2^{\min}$ від ока оператора до оптичної осі об'єктиву згідно рис. 2.1 становить 37,4 мм. Максимальне віддалення $l_3^{\max}$ об'єктиву від напівпрозорого дзеркала визначається залежністю:

$$l_3^{\max} = (D_e - D_{\text{zin}}) / 2 \operatorname{tg} \beta_e - l_2^{\min},$$

де $D_e = 34,8$ мм – вертикальна складова прямокутної апертури об'єктиву, і становить 45,7 мм.

Кут γ , при якому конструкція індикатора не затінює оточуючий простір, визначається залежністю:

$$\operatorname{tg} \gamma = l_3^{\max} / (l_2^{\min} + D_e / 2)$$

і становить 40° , що близько до можливостей людського ока спостерігати оточуючий простір у верхній півсфері.

Мінімальне віддалення $l_3^{\min}$ об'єктиву від напівпрозорого дзеркала визначається залежністю:

$$l_3^{\min} \approx (l_2^{\min} \operatorname{tg} \beta_e + D_{\text{zin}} / 2) / (1 - \operatorname{tg} \beta_e)$$

і становить 11 мм. При цьому вертикальна складова прямокутної апертури об'єктиву D'_e визначається залежністю:

$$D'_e = [D_{\text{zin}} + 2(l_1 + l_3^{\min}) \operatorname{tg} \beta_e] / (1 - \operatorname{tg} \beta_e)$$

і становить 19 мм, тобто умовний діаметр вихідної зіниці об'єктиву D' сягає лише 31,7 мм. Габарити робочої площадки формувача

зображення 2 при цьому становлять 16,8x12,2 мм. При розмірі пікселя 4,8 мкм роздільна здатність індикатора становить 0,15 мрад (31").

Конструкція знаходиться поза межами поля зору індикатора, а затінення оточуючого простору починається з кута β_e .

Таким чином, обираючи параметр l_3 в діапазоні (11 - 45,7) мм в залежності від конструкції шолому, до якого кріпиться індикатор, конструктор має усі відомі параметри оптичної схеми, необхідні для габаритного розрахунку.

Проблемним питанням рефракторної оптичної схеми є мале поле зору, яке спостерігає оператор. Справа в тому, що вимоги до розміщення на захисному шоломі/голові визначають відстань l_2 ока від напівпрозорого дзеркала 1, відстань l_1 напівпрозорого дзеркала 1 від вихідної зіниці об'єктиву 2 і розмір D_x вихідної зіниці об'єктиву (рис. 2.2).

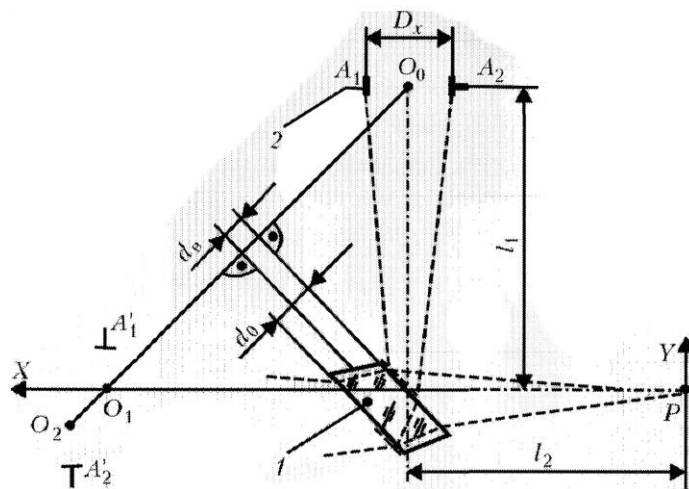


Рисунок 2.2 - Оптична схема НШІ з напівпрозорим дзеркалом у вигляді плоскопаралельної пластини: 1 – напівпрозоре дзеркало, 2 – вихідна зіниця об'єктиву. Крайні промені показані пунктиром

При цьому вертикальна складова $2\beta_e$ миттєвого поля зору (МПЗ – частина інформаційного поля зору, що спостерігається оком з точки P) визначається формулою:

$$\operatorname{tg} \beta_e = D_x / 2(l_1 + l_2). \quad (2.4)$$

Стосовно шолому із захисною маскою маємо наступні габаритні обмеження: $l_1 \geq 70$ мм, $l_2 \geq 65$ мм і $D_x \leq 20$ мм. Підставивши граничні значення в (2.4), знаходимо $2\beta_e \leq 8,48^\circ$. При стандартному співвідношенні сторін кадру 3:4 горизонтальна складова $2\beta_z$ МПЗ не перевищить $11,3^\circ$, і діагональ МПЗ складе не більше $14,1^\circ$. Звідси можна зробити перший висновок: поле зору НШІ, встановленого на шоломі із захисною маскою, при реалізації класичної рефракторної оптичної схеми не може перевищити $14,1^\circ$.

Розглянемо можливі шляхи збільшення поля зору рефракторної схеми. Будемо орієнтуватися на максимальне поле зору, яке може бути досягнуте, якщо виходити з критерію добротності об'єктиву C_D (2.3), введеного Д.С. Волосовим [16].

Поле зору об'єктиву 2β і його горизонтальна складова $2\beta_z$ зв'язані співвідношенням $2\beta = 1,25\beta_z$. Для мінімізації габаритів НШІ в ній застосовується світлосильний об'єктив з відносним отвором 1:1, тобто $f'=D$, де D – діаметр вихідної зіниці об'єктиву. Якщо врахувати, що ширина вихідної зіниці об'єктиву визначається за формулою

$$D_z = 2(l_1 + l_2) \operatorname{tg}\beta_z, \quad (2.5)$$

тоді:

$$D = (D_x^2 + D_z^2)^{1/2} = [D_x^2 + 4(l_1 + l_2)^2 \operatorname{tg}^2\beta_z]^{1/2}. \quad (2.6)$$

Підставивши в формулу (2.3) вираз (2.6) і габаритні обмеження стосовно захисного шолому, отримаємо вираз для обчислення параметра β_z , що задовольняє критерію добротності Д.С. Волосова:

$$0,24 \leq (400 + 72900 \operatorname{tg}^2\beta_z)^{1/4} \operatorname{tg}^2 1,25\beta_z.$$

Рішення цього рівняння дає результат $2\beta_z \leq 26^\circ$. Тоді $2\beta_e \leq 19,5^\circ$ і $2\beta_{\max} \leq 32,5^\circ$. Звідси можна зробити другий висновок: максимальне поле зору об'єктиву, яке може бути досягнуте при розміщенні індикатору на захисному шоломі, складає $32,5^\circ$.

Найбільш простим способом збільшення вертикальної складової МПЗ є виконання напівпрозорого дзеркала у вигляді світлоподільного кубика [15]. В цьому варіанті вертикальна складова $2\beta_e$ МПЗ визначається за формулою

$$\operatorname{tg} \beta_{\varepsilon} = D_{\varepsilon}/2[l_1 + l_2 - D_{\varepsilon}(1 - 1/n)], \quad (2.7)$$

де n – показник заломлення скла, з якого виготовлений кубик.

Стосовно захисного шолому і при використанні скла K108 ($n=1,5183$) знаходимо: $2\beta_{\varepsilon} \leq 8,9^\circ$; $2\beta_{\varepsilon} \leq 11,9^\circ$ і діагональ МПЗ складе не більше $14,9^\circ$. Звідси можна зробити наступний висновок: поле зору НШІ, встановленого на захисному шоломі, при введенні в оптичну схему світлоподільного кубика не може бути більше $14,9^\circ$, але, тем не менше, воно на 5% більше, ніж при використанні напівпрозорого дзеркала у вигляді плоскопаралельної пластини.

Більш ефективним способом збільшення вертикальної складової МПЗ є застосування товстої пластини 1 з ділянками світлоподільника на протилежних площинах (рис. 2.2). Якщо товщину пластини позначити d_0 , то приведенне до повітря її значення складе $d_{\varepsilon} = d_0/n$. Якщо використовується скло K108, то $d_{\varepsilon} = 0,6586d_0$.

Відстань між центром O_0 вихідної зіниці об'єктиву 2 і його зображеннями O_1 та O_2 у верхньому і нижньому світлоподільниках відповідно при куті нахилу пластини до оптичної осі 45° складе:

$$O_0O_1 = \sqrt{2} l_1; \quad O_0O_2 = \sqrt{2} l_1 + 2d_{\varepsilon}.$$

Сумістимо початок системи координат XU (вісь X спрямована вздовж нульової лінії візування) з оком оператора в точці P . Тоді координати точок A'_1 (зображення краю вихідної зіниці A_1 у верхньому світлоподільнику) та A'_2 (зображення краю вихідної зіниці A_2 у нижньому світлоподільнику) складе:

$$A'_1[(l_1 + l_2); D_{\varepsilon}/2]; \quad A'_2[(l_1 + l_2 + \sqrt{2} d_{\varepsilon}); -(D_{\varepsilon}/2 + \sqrt{2} d_{\varepsilon})].$$

Вертикальна складова миттєвого поля зору вгору $\beta_{\varepsilon 2}$ знаходиться за формулою (2.4), а вертикальна складова миттєвого поля зору униз $\beta_{\varepsilon 1}$ обчислюється за формулою

$$\operatorname{tg} \beta_{\varepsilon 1} = -(D_{\varepsilon}/2 + \sqrt{2} d_{\varepsilon}) / (l_1 + l_2 + \sqrt{2} d_{\varepsilon}). \quad (2.8)$$

Стосовно захисного шолому з формули (2.4) знаходимо $\beta_{\varepsilon 2} = 4,24^\circ$, а формула (2.8) приймає вигляд

$$\operatorname{tg} \beta_{\varepsilon 1} = -(10 + 0,9314d_0) / (135 + 0,9314d_0).$$

На рис. 2.3 зображені графіки (1 – 4) залежностей $|\beta_{\text{вн}}|$; сумарної вертикальної складової МПЗ: $2\beta_{\text{в}} = \beta_{\text{вз}} - \beta_{\text{вн}}$; горизонтальної складової МПЗ: $2\beta_{\text{г}} = 4(\beta_{\text{вз}} - \beta_{\text{вн}})/3$ і поля зору об'єктиву 2β в залежності від параметру d_0 . Як видно з графіка 4, при максимально припустимій товщині пластини $d_0 = 10$ мм (при товщині більше 10 мм пластина буде торкатись захисного щитка шолома) поле зору НШІ сягне $19,8^\circ$, тобто на 30% буде більше, ніж при використанні плоскопаралельної пластини з одним світлоподільником.

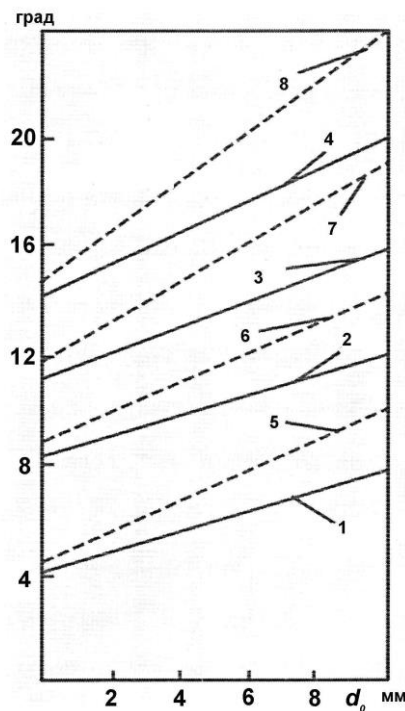


Рисунок 2.3 - Графіки залежностей складових МПЗ і поля зору від параметру d_0 в НШІ з напівпрозорим дзеркалом у вигляді товстої пластини (суцільна лінія) і у вигляді складного світлоподільного

кубика (пунктир): 1 і 5 – $|\beta_{\text{вн}}| = f(d_0)$;
2 і 6 – $2\beta_{\text{в}} = f(d_0)$; 3 і 7 – $2\beta_{\text{г}} = f(d_0)$; 4 і 8 – $2\beta = f(d_0)$

Ширина вихідної зіниці D_z об'єктиву обчислюється за формулою

$$D_z = 2(l_1 + l_2 + \sqrt{2} d_0) \operatorname{tg} \beta_{\text{г}}.$$

При прийнятих вище значеннях l_1 , l_2 і $d_0 = 10$ мм ширина вихідної зіниці об'єктиву лежить в діапазоні (26,7 - 40) мм. Тобто при прямокутній апертурі вихідної зіниці умовний світловий діаметр об'єктиву складе (33,4 - 44,7) мм. Якщо орієнтуватись на світлосильний об'єктив з відносним отвором 1:1, то його фокусна

відстань f' повинна бути в інтервалі (33,4 - 44,7) мм. Коефіцієнт добротності C_D такого об'єктиву згідно [16] складе менше ніж 0,24, а це означає, що у розробників не буде труднощів з його розрахунком.

Лінійні розміри формувача зображення визначаються за формулами:

$$\text{висота} = 2f'tg\beta_e = (5 - 9,3) \text{ мм}; \text{ ширина} = 2f'tg\beta_e = (6,6 - 12,4) \text{ мм}.$$

Якщо дотримуватись вимог до роздільної здатності, що пред'являються до перспективних НШІ - 1024 x 1280 пікселів [17], то розмір пікселя має бути в діапазоні (5 - 9) мкм. Зауважимо, що сучасні матричні формувачі зображення забезпечують таку роздільну здатність.

При реалізації цього методу збільшення поля зору необхідно враховувати наступну обставину. Пучки променів, що будують зображення на кутах візування нижче $4,24^\circ$, проходять перший світлоподільник і відбиваються від другого. Тобто світлопропускання оптичної системи в цій частині поля зору буде нижче, чим в решті. Нормативна документація [18], що діє, регламентує значення яскравого контрасту k для внутрішньо-кабінних систем індикації. Для коліматорних систем відображення інформації k визначається за формулою [19]

$$k = C T, \quad (2.9)$$

де C – відношення яскравості формувача зображення і фона, а T – відношення світлопропускання в каналах спостереження зображення і простору цілей.

В нашому випадку параметр T для верхнього (T_e) і нижнього (T_n) світлоподільвача визначається за формулами

$$T_e = \tau_o \rho_1 / (1 - \rho_1); \quad (2.10)$$

$$T_n = \tau_o (1 - \rho_1) \rho_2 / (1 - \rho_2); \quad (2.11)$$

де ρ_1 – коефіцієнт відбиття верхнього світлоподільника, ρ_2 – коефіцієнт відбиття нижнього світлоподільника, а $\tau_o \approx 1$ – коефіцієнт пропускання об'єктиву.

Для того, щоб вирівняти контраст зображень у верхній і нижній частинах поля зору, є два шляхи. Перший – варіювати значенням C , тобто формувати зображення в різних ділянках формувача з різною яскравістю світіння. Другий – виконати умову $T_v = T_n$. Вона виконується, якщо

$$\rho_2 = \rho_1 / (1 - \rho_1 + \rho_1^2). \quad (2.12)$$

Аналіз залежностей (2.9) - (2.12) показує наступне. При $\rho_1 = 0,365 \pm 0,015$ значення ρ_2 лежить в діапазоні (0,45 - 0,5). В цьому випадку $T_v = (0,61 - 0,65)$, $T_n = (0,5 - 0,54)$ і однаковий контраст забезпечується в інтервалі значень $(0,54 - 0,61)C$.

При виконанні напівпрозорого дзеркала у вигляді складного світлоподільного кубика складеного з двох призм АР-90°, приклеєних до протилежних площин плоскопаралельної пластини товщиною d_0 , вертикальна складова $\beta_{вг}$ МПЗ вгорі визначається за формулою (2.7), а вертикальна складова $\beta_{вн}$ МПЗ внизу визначається за формулою

$$\operatorname{tg} \beta_{вн} = -(D_x/2 + \sqrt{2} d_0) / [l_1 + l_2 - D_x(1 - 1/n) + \sqrt{2} d_0/n]. \quad (2.13)$$

Стосовно захисного шолому і при використанні скла К108 формула (2.13) приймає вигляд

$$\operatorname{tg} \beta_{вн} = -(10 + \sqrt{2} d_0) / (128,2 + 0,9314 d_0).$$

На рис. 2.3 також зображені графіки (5 – 8) залежностей $|\beta_{вн}|$; сумарної вертикальної складової МПЗ: $2\beta_v = \beta_{вг} - \beta_{вн}$; горизонтальної складової МПЗ: $2\beta_z = 4(\beta_{вг} - \beta_{вн})/3$ і поля зору об'єктиву 2β в залежності від параметру d_0 . Як видно з графіка 8, при $d_0 = 10$ мм поле зору НШІ сягає 24°, тобто на 40% більше, ніж при використанні напівпрозорого дзеркала у вигляді плоскопаралельної пластини з одним світлоподільником.

Відомий інший метод збільшення поля зору в коліматорному візирі [20, 21]. При застосування до НШІ його суть полягає в наступному. Вертикальну складову поля зору НШІ обмежують значенням $4\beta_v$, і за допомогою напівпрозорого дзеркала 1 спеціальної конструкції (рис. 2.4) формують два МПЗ, що стикаються, з кутовим розміром вертикальної складової $2\beta_v$ кожний.

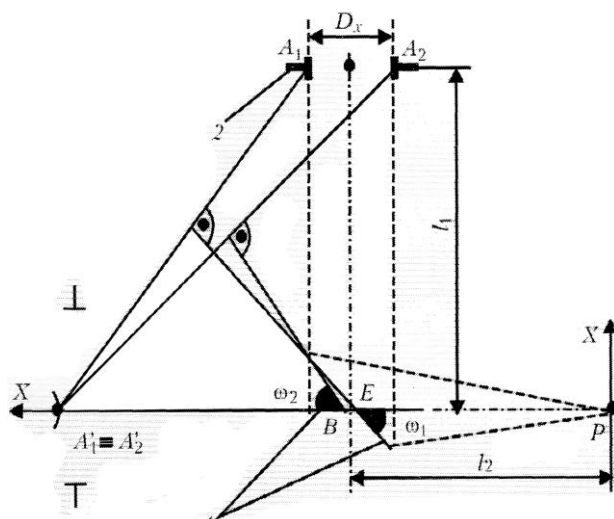


Рисунок 2.4 - Оптична схема НШІ з напівпрозорим дзеркалом спеціальної конструкції: 1 – напівпрозоре дзеркало, 2 – вихідна зіниця об’єктиву (крайні промені показані пунктиром)

Як видно з рис. 2.4, для того, щоб край A_1 вихідної зіниці об’єктиву 2 відображався нижнім елементом 1 на осі X в точці A'_1 , кут ω_1 нахилу цього елементу до осі X має бути рівним $\operatorname{tg} \omega_1 = 1 - D_{\text{ш}}/2 l_2$, а координата x_E його верхнього краю (точка E) повинна визначатись за формулою

$$x_E = l_2[1 + D_{\text{ш}}/(l_1 + l_2)] - D_{\text{ш}}/2. \quad (2.14)$$

Щоб край A_2 вихідної зіниці об’єктиву 2 відображався верхнім елементом 1 на осі X в точці A'_2 , кут ω_2 нахилу цього елементу до осі X має бути рівним $\operatorname{tg} \omega_2 = 1 + D_{\text{ш}}/2 l_2$, а координата x_B його нижнього краю (точка B) повинна визначатись за формулою

$$x_B = l_2[1 - D_{\text{ш}}/(l_1 + l_2)] + D_{\text{ш}}/2. \quad (2.15)$$

Стосовно захисного шолому маємо: $\omega_1 = 40,2^\circ$; $\omega_2 = 49,1^\circ$; $x_B = 65,37$ мм, $x_E = 64,63$ мм і, теоретично, вертикальна складова поля зору НШІ може сягати 17° . Однак, практично, вертикальну складову поля зору слід обмежити значенням $[4\beta_{\text{в}} - d_{\text{зін}}/(l_1 + l_2)]$, де $d_{\text{зін}}$ - діаметр зіниці ока. В іншому випадку при кінцевих розмірах зіниці ока в центрі поля зору будуть спостерігатися паразитні рефлексії. При $d_{\text{зін}} = (8 - 2)$ мм вертикальна складова поля зору складе $(13,6 - 16,1)^\circ$, горизонтальна – $(18,1 - 21,5)^\circ$ і поле зору об’єктиву сягне $(22,6 - 26,9)^\circ$.

Ширина вихідної зіниці об'єктиву D_z обчислюється за формулою (2.5) і складає (43 - 51,3) мм. Тобто увесь умовний світловий діаметр об'єктиву складає (47,4 – 55) мм. Коефіцієнт добротності C_D такого об'єктиву з відносним отвором 1:1 складає менше 0,24, і це означає, що у розробників не буде труднощів з його розрахунком.

Конструктивно напівпрозоре дзеркало 1 може бути виготовлене з трьох склеєних плоскопаралельних пластин. Нижня пластина повинна мати товщину до 5 мм вздовж осі X , а верхня повинна бути склеєна з двох деталей: першої завтовшки BE , другої товщиною (5 мм – BE). Склейка пластин повинна бути по площині BE .

Для спрощення конструкції напівпрозорого дзеркала доцільно сумістити точки B і E . З рівності правих частин рівнянь (2.14) і (2.15) знаходимо, що це виконується при умові $l_1 = l_2$.

Таким чином, цей метод дозволяє на (37 – 47)% збільшити поле зору НШІ у порівнянні з НШІ, де використовується напівпрозоре дзеркало у вигляді плоскопаралельної пластини з одним світлоподільником. Метод менш ефективний при експлуатації НШІ в умовах низької освітленості фону, тобто при великому діаметрі зіниці ока.

Кардинальним методом збільшення МПЗ в системі відображення інформації вважається застосування «матричного» напівпрозорого дзеркала. Цей тип дзеркала був розроблений в 70-х роках минулого століття к.т.н. К.С. Чеко для бортових пілотажно-прицільних індикаторів. Пізніше д.т.н. В.А. Протопопов запропонував використовувати його в НШІ. Однак з-за ряду технологічних обмежень в той час він не знайшов практичного застосування. Основна ідея цього методу полягає в наступному. При обмеженій апертурі вихідної зіниці колімуючого об'єктиву 2, оптична вісь якого ортогональна лінії візування, спостереження широкого пучка променів, що виходить з об'єктиву в діапазоні кутів $\pm\beta_v$, забезпечується системою малих напівпрозорих відбиваючих

елементів, розташованих під кутом до лінії візування перпендикулярно площині напівпрозорого дзеркала 1 (рис. 2.5).

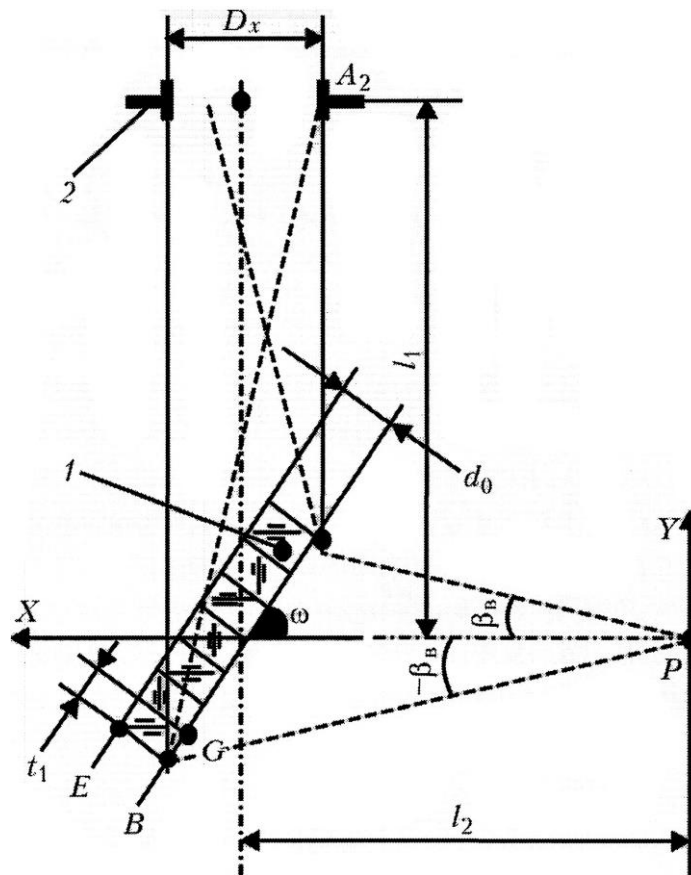


Рисунок 2.5 - Оптична схема НШІ з «матричним» напівпрозорим дзеркалом: 1 – напівпрозоре дзеркало, 2 – вихідна зіниця об’єктиву. Крайні промені показані пунктиром

В прийнятій на рис. 2.5 системі координат і згаданих вище габаритних обмеженнях - координата y_B точки B , в якій сходяться промінь, що йде з краю A_2 вихідної зіниці об’єктиву 2 під кутом $-\beta_6$, та лінія візування кута $-\beta_6$ з точки P , знаходиться з габаритних співвідношень рис. 2.5:

$$y_B / (D_x/2 + l_2) = D_x / (y_B + l_1). \quad (2.16)$$

Стосовно захисного шолому з формули (2.16) знаходимо $y_B = -17,2$ мм. Тобто максимальний кут візування униз не може перевищити значення $\beta_6 = y_B / (D_x/2 + l_2) = -12,9^\circ$. Якщо вертикальну складову поля зору об’єктиву обмежити значенням $19,5^\circ$, як це витікає з критерію добротності, то горизонтальна складова складе 26° , і загальне поле зору НШІ буде дорівнювати $32,5^\circ$. Ширина вихідної зіниці об’єктиву

D_z в цьому випадку буде дорівнювати 62,3 мм. Тобто умовний світловий діаметр об'єктиву не перевищить 65,5 мм. Якщо орієнтуватись на світлосильний об'єктив з відносним отвором 1:1, то його фокусна відстань f' має бути 65,5 мм.

Габаритний розрахунок «матричного» дзеркала виконується таким чином.

а) Обчислюється кут ω нахилу дзеркала до оптичної осі за формулою

$$\operatorname{tg} \omega = 2l_2 \operatorname{tg} \beta_6 / D_x;$$

б) Нижній відбиваючий елемент BE проходить через точку B перпендикулярно до лицьової площини дзеркала;

в) При обраній товщині дзеркала d_0 визначається точка E перетину нижнього відбиваючого елемента з протилежною площиною дзеркала;

г) Визначається віддалення t_1 точки B від точки G на лицьовій площині дзеркала, яка лежить на шляху променя від точки E до точки P . Це віддалення t_1 знаходиться на основі принципу Ферма для променя EGP :

$$n t_1 / (t_1^2 + D_x^2)^{1/2} = [h \cos(\omega - \beta_6) - t_1] / \{h^2 \sin^2(\omega - \beta_6) + [h \cos(\omega - \beta_6) - t_1]^2\}^{1/2},$$

де $h = (l_2 + D_x/2) \sec \beta_6$;

д) Далі за таким же алгоритмом послідовно визначаються положення усіх відбиваючих елементів дзеркала.

Стосовно захисного шолому маємо: $\omega = 48,16^\circ$, і при $d_0 = 10$ мм та використанні скла К108 дзеркало формується з семи відбиваючих елементів різної товщини від 5,7 мм (нижній елемент) до 2,75 мм (верхній елемент). Крайні елементи виконуються у вигляді призм для проходження нижнього крайнього променя крізь дзеркало і верхнього крайнього променя в напрямку об'єктиву. Технологія виготовлення такого дзеркала передбачає виготовлення семи тонких пластин, нанесення на них світлоподільника, склейку пластин в моноблок і розрізання моноблока для забезпечення заданої товщини дзеркала.

В усіх проаналізованих варіантах побудови НШІ використовується колімуючий об'єктив прямокутної апертури. Технологія виготовлення такого об'єктиву передбачає виготовлення проміжних кілець для об'єктиву із ситалу, центрування лінз, склейку лінз і проміжних кілець та фрезерування склеєного блока для отримання прямокутної форми.

В роботі [10] показано ще один варіант збільшення поля зору в НШІ – використання світлоподільного кубика з сферичною заломлюючою або відбиваючою поверхнею і проекційного об'єктиву круглої апертури. В цьому варіанті поле зору НШІ може сягнути 20° .

2.2.2 Габаритний розрахунок рефлекторної оптичної схеми індикатору

Рефлекторна схема НШІ (рис. 2.6) будується на базі напівпрозорого дзеркала 1 і дзеркального об'єктиву 2, в фокальній площині якого за допомогою проекційного об'єктиву 3 створюється проміжне зображення формувача 4 [15]. Тобто, по суті це схема мікроскопу, роль окуляра в якому виконує дзеркальний об'єктив 2. Вихідною зіницею в цій схемі є зображення апертурної діафрагми проекційного об'єктиву 3 в дзеркалі 2.

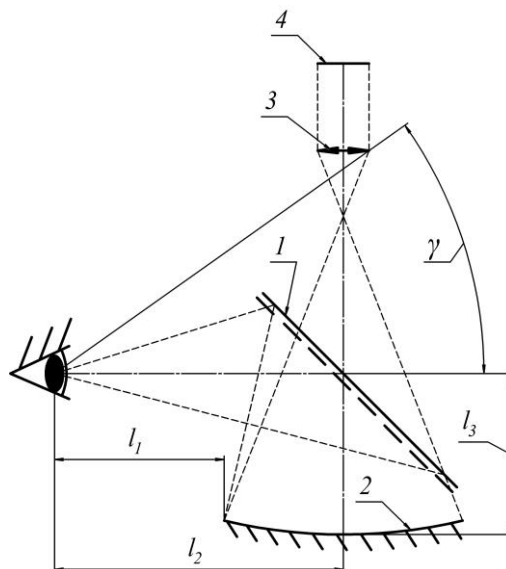


Рисунок 2.6 - Рефлекторна оптична схемі НШІ: 1- напівпрозоре дзеркало, 2 – дзеркальний об'єктив, 3 – проекційний об'єктив, 4 – формувач зображення

Для мінімізації польових аберацій дзеркального об'єктиву 2 вихідна зіниця індикатора повинна співпадати з центром кривизни дзеркала 2.

При обмеженні відстані ока від найближчої оптичної деталі (дзеркального об'єктиву 2) $l_1 = 20$ мм - габаритні розміри оптичної схеми становлять: $l_2 = 30$ мм, $l_3 = 13,4$ мм. Фокусна відстань $f'_{\text{дз}}$ дзеркального об'єктиву 2 визначається формулою

$$f'_{\text{дз}} = (l_2 + l_3)/2$$

і становить 21,7 мм.

Габарити прямокутної апертури об'єктиву 2 не мають перевищувати 25,5 x 19,1 мм.

Кут γ , при якому конструкція індикатора не затінює оточуючий простір, становить $\approx 45^\circ$, що близько до можливостей людського ока спостерігати оточуючий простір у верхній півсфері.

Для спрощення конструкції індикатору і зменшення її впливу на умови спостереження оточуючого простору напівпрозоре дзеркало 1 і дзеркальний об'єктив 2 мають бути виконані у вигляді оптичного моноблоку.

Суттєвим недоліком розглянутої схеми є низьке світлопропускання в каналі формування растрової інформації (до 20%). Якщо це не суттєво при використанні НШІ всередині транспортного засобу, то при роботі на відкритій місцевості в сонячний день це може завадити сприйняттю інформації. Тому ряд провідних фірм перейшли на децентровані оптичні схеми побудови НШІ. На наш погляд, найбільш вдалим є оптичні схеми [22, 23].

В першій з них (рис. 2.7) формувач зображення 1 знаходиться у фокальній площині позаосьової оптичної схеми, що містить лінзові компоненти 2 та напівпрозорий концентричний або телескопічний меніск 3. При малій товщині меніску 3 такі його форми практично не впливає на якість сприйняття оточуючого простору. При використанні монохромного формувача зображення 1 на меніск 3 наноситься інтерференційне покриття типу

$\{(90^\circ \pm 3^\circ)(41^\circ \pm 3^\circ)\} \times 9^\circ \{90^\circ \pm 3^\circ)(41^\circ \pm 1,5^\circ)\}$, максимум відбиття якого співпадає з максимумом випромінювання формувача 1.

В другій схемі (рис. 2.8) формувач зображення 1 знаходиться у фокальній площині позаосьової оптичної схеми, що містить лінзові компоненти 2 та складну оптичну деталь, яка склеєна з двох призматичних елементів 3 і 4.

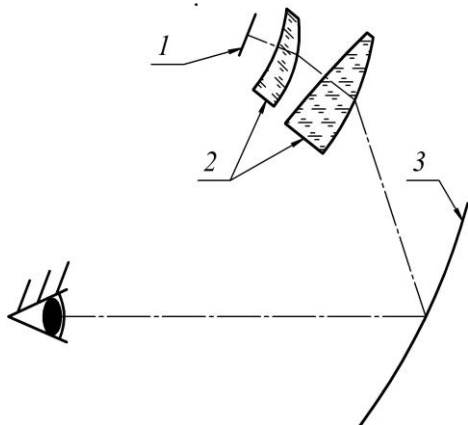


Рисунок 2.7 - Варіант побудови оптичної схеми НШ: 1- формувач зображення 2, - лінзовий компонент об'єктиву, 3 - напівпрозорий меніск

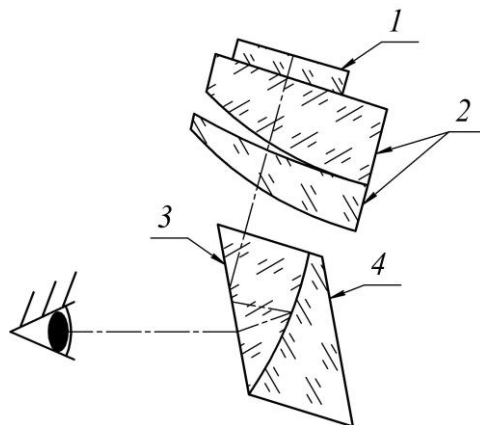


Рисунок 2.8 - Варіант побудови оптичної схеми НШ: 1- формувач зображення, 2 - лінзовий компонент об'єктиву, 3, 4 – призматичні оптичні елементи

Елемент 3 обмежений вхідною дифракційною поверхнею для корекції астигматизму і хроматизму зображення при використанні кольорового формувача зображення 1, плоскою поверхнею і асферичною тороїдною поверхнею з нейтральним світлоподільником типу 44Р.43Р.44Р.43Р. Елемент 4 обмежений асферичною тороїдною поверхнею і плоскою поверхнею, яка паралельна плоскій поверхні елементу 3. Разом елементи 3 і 4 складають плоско-паралельну пластину, що не впливає на якість сприйняття оточуючого простору. Конструктивною особливістю схеми є те, що після проходження вхідної дифракційної поверхні на елементі 3 відбувається повне внутрішнє відбиття світла від плоскої поверхні до тороїдної.

2.2.3 Синтез голографічної оптичної схеми індикатору

Дія голографічного оптичного елементу (ГОЕ) основана на явищі дифракції на інтерференційній структурі, сформованій двома когерентними пучками променів. Якщо ми маємо рівняння двох світлових хвиль в експонентній формі: об'єктової $O = E_o e^{i\phi_o}$ і опорної $R = E_r e^{i\phi_r}$, де i – інтенсивність, E – амплітуда, ϕ - фаза, то розподіл інтенсивності I в інтерференційній картині, записаний в світлореєструючому середовищі як сума цих світлових хвиль, виражається формулою

$$I = E_o^2 + E_r^2 + E_o E_r e^{i(\phi_o - \phi_r)} + E_o E_r e^{-i(\phi_o - \phi_r)}. \quad (2.17)$$

Перші два члени рівняння (2.17) характеризують постійну складову інтенсивності. Третій та четвертий члени рівняння містять інформацію про фазу об'єктової хвилі.

При експонуванні світлореєструючого середовища на протязі часу t - розподіл світлопропускання в ньому T описується рівнянням

$$T = T_0 - \beta I t, \quad (2.18)$$

де T_0 – початкове світлопропускання середовища, а β - постійна світлочутливість середовища.

Підставляючи (2.17) в (2.18), отримаємо наступний вираз для розподілу світлопропускання

$$T = T_0 - \beta t (E_o^2 + E_r^2) - \beta t E_o E_r [e^{i(\phi_o - \phi_r)} + e^{-i(\phi_o - \phi_r)}]. \quad (2.19)$$

Оптична деталь з таким розподілом світлопропускання зветься ГОЕ. Для відновлення об'єктової хвилі цю деталь необхідно освітити світловим пучком променів подібним або близьким за формою до опорної хвилі. Таке відновлення можна описати рівнянням

$$E_R = E_r e^{i\phi_R} T. \quad (2.20)$$

Застосований тут символ R замість r означає, що відновлюючий пучок не повинен строго відповідати опорному пучку, який був використаний при запису голограми. Підставивши (2.19) в (2.20), отримаємо:

$$E_R = E_r e^{i\phi_R} T_0 - E_r e^{i\phi_R} \beta t (E_o^2 + E_r^2) - E_r e^{i\phi_R} \beta t E_o E_r [e^{i(\phi_o - \phi_r)} + e^{i(\phi_o - \phi_r)}]. \quad (2.21)$$

Перша складова рівняння (2.21) описує хвилю, що розповсюджується в напрямку опорної хвилі. Друга складова є віртуальною об'єктовою хвилею. Якщо фази опорної і відновлюючої хвиль рівні, то друга складова буде ідентична об'єктовій хвилі за винятком амплітуди. У підсумку ми отримаємо повністю відновлену об'єктову хвилю. Третя складова описує реальну об'єктову хвилю.

З рівняння (2.21) видно, що фаза ϕ_o позитивна у реальній об'єктовій хвилі і негативна у віртуальній. Це означає, що ці дві хвилі лежать по різні боки голограми. Реальне зображення може створюватись хвилями, що йдуть у позитивному напрямку. Цей напрямок співпадає з напрямком опорного пучка.

На цьому ефекті і будуються усі ГОЕ: лінзи, дзеркала [24]. Основним реєструючим середовищем є біхромат желатину, у якого високі показники просторової модуляції. Конструктивною особливістю ГОЕ є те, що його дія описується законами фізичної оптики, а не геометричної. Наприклад, якщо опорна хвиля сферична, а об'єктова – плоска, то при відновленні сферичною хвилею формується плоска, що еквівалентно дії лінзи або дзеркала, а напрямок її розповсюдження визначається схемою запису ГОЕ. Специфіка роботи ГОЕ передбачає використання яскравого джерела світла з квазімонохроматичним спектром світіння (ширина спектру на рівні сигналу 0,5 не повинна перевищувати 10 нм).

Методи розрахунку оптичних схем на базі ГОЕ наведені в роботі [25]. На рис. 2.9 зображена принципова оптична схема голографічної НШ.

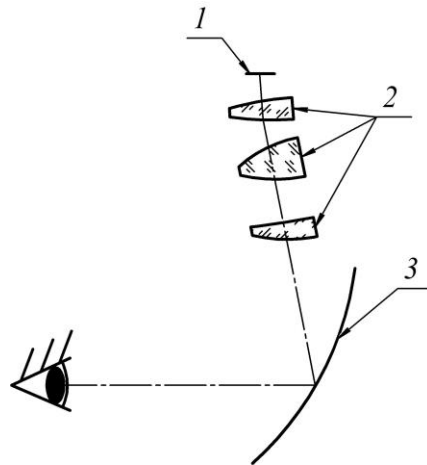


Рисунок 2.9 - Оптична схема голографічного НШП: 1- формувач зображення, 2 - лінзові компоненти проєкційного об'єктиву, 3 - голографічне відбиваюче дзеркало

Особливістю цієї схеми є те, що проєкційний об'єктив створює проміжне зображення, створене формувачем 1, в фокальній поверхні відбиваючого ГОЕ 3. Тому вихідною зіницею в цій схемі є зображення апертурної діафрагми проєкційного об'єктиву, створене ГОЕ 3.

Як видно з рис. 2.9, ця схема близька за компоновкою до схеми на рис. 2.7. Відмінності лише в принципі формування зображення та конструктивному виконанні елементу 3.

Досвід, набутий в Україні при створенні бортових голографічних пілотажно-прицільних індикаторів [26] показує, що застосування ГОЕ дає певні переваги при компоновці, але веде до ряду технологічних проблем. Біхромат желатину є органічною речовиною, яка зазнає впливу вологи. Тому ГОЕ має бути захищений захисним склом. Вплив ядерного вибуху на біхромат желатину не досліджений. В полі зору оператора можуть з'являться паразитні зображення при попаданні на голограму яскравого світла, що містить складову спектра формувача зображення. Тому автори є прихильниками використання інтерференційних дзеркал замість ГОЕ. Принципова оптична схема такого НШП ідентична схемі на рис. 2.9. Наприклад,

покриття $\{[(90ИЭх3)(41ИЭх3)]х9\}(90ИЭх3)(41ИЭх1,5)$ має нульову групу міцності.

2.3 Вимоги до компоновки індикатора на захисному шоломі/голові оператора

При компоновці НШІ на захисному шоломі/голові оператора НРК необхідно враховувати наступне:

- індикатор повинен мінімально зміщувати центр тяжіння голови;
- маса і габарити індикатора повинні бути мінімальними (сучасні НШІ мають масу приблизно 1,5 кг);
- індикатор не повинен обмежувати свободу рухів оператора;
- можливість застосування оператором протигазу, навушників;
- індикатор повинен мінімально обмежувати поле зору оператора;
- безпеку оператора в разі аварії транспортного засобу, з якого ведеться управління НРК;
- індикатор повинен мати засоби для індивідуальної підгонки на шоломі в залежності від бази очей оператора.

2.4 Побудова камери широкого поля зору

Розглянемо рішення задачі визначення імовірності $P(N)$ успішного виявлення цілі на визначеній дистанції спостереження із застосуванням цифрової камери широкого поля зору (КШПЗ) в складі ППС.

Кількість циклів V , які приходяться на критичний розмір об'єкту пошуку, визначимо за формулою

$$V = A_u^{1/2} F_u / D, \quad (2.22)$$

де A_u – площа об'єкту пошуку; D – дистанція до об'єкта пошуку; а F_u – порогова частота, яка приведена до характеристик цілей і умов спостереження [27]

$$F_u = \int_{\omega 1}^{\omega 2} [(k_{\zeta i} / S_i(\omega))]^{1/2} d\omega, \quad (2.23)$$

де k_{zin} – контраст об’єкта, приведений до вхідної зіниці об’єктиву КШПЗ; $S_n(\omega)$ – порогова частотно-контрастна функція КШПЗ; ω – просторова частота (цикли/мрад) у просторі об’єктів; ω_1 і ω_2 – значення просторової частоти в просторі об’єктів в точках перетину k_{zin} з $S_n(\omega)$.

Контраст об’єкта k_{zin} , приведений до вхідної зіниці КШПЗ, визначається за формулою [28]

$$k_{zin} = k_u [1 + \chi(\tau_c^{-1} - 1)], \quad (2.24)$$

де k_u – контраст об’єкта 1; χ – коефіцієнт, що характеризує відношення яскравості траси спостереження до яскравості фону; τ_c – середнє значення коефіцієнта пропускання атмосфери.

Якщо взяти до уваги те, що при пошуку цілі за допомогою НРК дистанція не перевищує 3000 метрів, то $\tau_c = 1$ і $k_{zin} = k_u$.

Порогова частотно-контрастна функція $S_n(\omega)$ обчислюється за формулою [27, 28]

$$S_n(\omega) = S_{oka}(\omega_{oka}) [k_\delta^{-2} + (169,6 \sigma / L_\delta)^2]^{1/2} / K(\omega), \quad (2.25)$$

де $S_{oka}(\omega_{oka})$ – порогова частотно-контрастна функція ока оператора; k_δ – коефіцієнт, що враховує зміну контрасту на дисплеї; σ^2 – дисперсія шуму яскравості зображення, обумовлена шумом системи, яка сприймається оком оператора; L_δ – яскравість дисплею (кд/м²); $K(\omega)$ – модуляційна передавальна функція (МПФ) КШПЗ, а ω_{oka} – частота (цикли/кутовий градус) в просторі зображення, яка визначається формулою

$$\omega_{oka} = 17,45 \omega / \gamma_{кут}, \quad (2.26)$$

де $\gamma_{кут}$ – кутове збільшення об’єкта, яке можна визначити як відношення кутового розміру об’єкта, який спостерігається оком на екрані дисплею, до кутового розміру цілі на вході КШПЗ за формулою

$$\gamma_{кут} = tg(x_u/250)/tg(X_u/D), \quad (2.27)$$

де x_u – ширина зображення об'єкта на екрані дисплею (мм); 250 мм – дистанція найкращого зору людини; X_u – ширина об'єкта.

Вираз для обчислення лінійного зображення об'єкта x_u на екрані дисплею при відомому значенні фокусної відстані f' об'єктиву КШПЗ має вигляд

$$x_u = \Gamma_{ел} f' \operatorname{tg}(X_u / D), \quad (2.28)$$

де $\Gamma_{ел}$ – електронне збільшення КШПЗ, яке визначається відношенням діагоналей дисплею і цифрового приймача випромінювання.

Порогову частотно-контрастну функцію ока оператора $S_{ока}(\omega_{ока})$ можна описати формулою [28, 29]

$$S_{ока}(\omega_{ока}) = a/b \omega_{ока} e^{-c \omega_{ока}} (1 + 0,06 e^{c \omega_{ока}})^{1/2}, \quad (2.29)$$

де коефіцієнти a , b і c знаходяться за формулами

$$a = 1 + 52,356 / A_d^{1/2} (1 + \omega_{ока} / 3); \quad (2.30)$$

$$b = 540 / (1 + 0,7 / (1 + 0,7 / L_d)^{0,2}); \quad (2.31)$$

$$c = 0,3 (1 + 100 / L_d)^{0,15}, \quad (2.32)$$

де A_d – площа екрану дисплею.

Для порогової частотно-контрастної функції ока оператора $S_{ока}(\omega_{ока})$ справедливе співвідношення [29]:

$$S_{ока}(\omega_{ока}) = k_k(\omega_{ока})^{-1},$$

де $k_k(\omega_{ока})$ – функція чутливості контрасту.

МПФ КШПЗ $K(\omega)$ залежить від її структурної схеми. Розглянемо структурну систему КШПЗ, зображену на рис. 2.10.

Загальний вираз для МПФ такої системи має вигляд [28]:

$$K(\omega) = K_8(\omega) K_9(\omega) K_{pc}(\omega) K_{кв}(\omega) K_{11}(\omega) K_d(\omega), \quad (2.33)$$

де $K_8(\omega)$ – МПФ об'єктива 8, $K_9(\omega)$ – МПФ фотоприймача випромінювання 9, $K_{pc}(\omega)$ – МПФ, яка враховує механічний рух КШПЗ при русі НРК 3 і скануванні оточуючого простору, $K_{кв}(\omega)$ – МПФ квантування сигналу в часі, $K_{11}(\omega)$ – МПФ фільтра 11, що відновлює і $K_d(\omega)$ – МПФ дисплею 12.

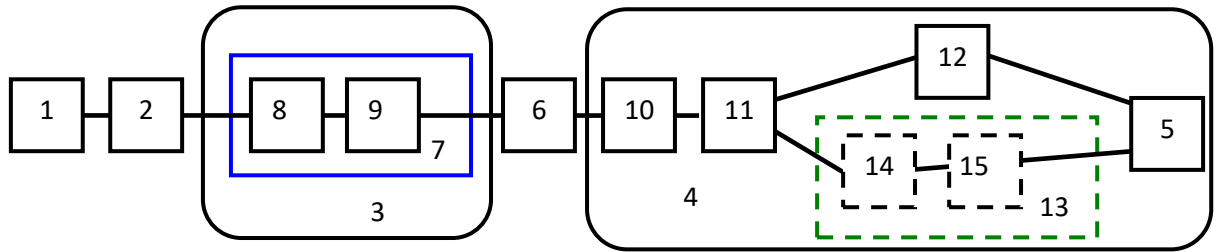


Рисунок 2.10 - Схема спостереження за об'єктами за допомогою КШПЗ: 1 – об'єкт пошуку на фоні оточуючого простору, 2 – атмосфера, 3 – шасі НРК, 4 – робоче місце оператора (РМО), 5 – оператор НРК, 6 – канал передачі даних з НРК на РМО (радіо або провідний), 7 – КШПЗ (у складі об'єктиву 8 і цифрового фотоприймача 9), 10 – процесор оброблення зображення, 11 – фільтр відновлення, 12 – віддалений дисплей або НШД 13 (у складі мікродисплею 14 на базі рідинно-кристалічної матриці та колімуючого об'єктиву – 15)

МПФ $K_8(\omega)$ об'єктиву 8 залежить від дифракції випромінювання на апертурних діафрагмах, від остаточних аберації, від якості фокусування зображення на фотоприймачі 9. З урахуванням цих факторів МПФ об'єктива $K_8(\omega)$ визначиться формулою

$$K_8(\omega) = K_{8d}(\omega) K_{8a}(\omega) K_{8p}(\omega), \quad (2.34)$$

де $K_{8d}(\omega)$ – МПФ дифракції випромінювання в об'єктиві, $K_{8a}(\omega)$ – МПФ аберацій об'єктиву, $K_{8p}(\omega)$ – МПФ, яка враховує розфокусування зображення.

Перелічені МПФ визначаються таким чином [27]

$$K_{8d}(\omega) = 2 \{ \cos^{-1}(\omega / \omega_{8m}) - (\omega / \omega_{8m}) [1 - (\omega / \omega_{8m})^2]^{1/2} \} / \pi; \quad (2.35)$$

$$K_{8a}(\omega) = 1 - 0,1575 [1 - 4(\omega / \omega_{8m} - 0,5)^2]; \quad (2.36)$$

$$K_{8p}(\omega) = 2J_1[2\pi \omega (1 - \omega / \omega_{8m}) / \omega_{8m}] / [2\pi \omega (1 - \omega / \omega_{8m}) / \omega_{8m}]; \quad (2.37)$$

де J_1 – функція Бесселя 1-го роду, а ω_{8m} – максимальна просторова частота оптичної системи (цикли/мрад), яка розраховується за формулою

$$\omega_{8m} = D_{8zin} / \lambda, \quad (2.38)$$

де $D_{8\text{зін}}$ – діаметр вхідної зіниці об’єктиву 8 КШПЗ (мм), а $\lambda = 0,55$ мкм – довжина хвилі.

Якщо просторова частота оптичної системи $\omega > \omega_{8m}$, то всі МПФ, пов’язані із об’єктивом 8, перетворюються на нуль, тобто

$$K_8(\omega) = K_{8\delta}(\omega) = K_{8a}(\omega) = K_{8p}(\omega) = 0. \quad (2.39)$$

МПФ $K_9(\omega)$ фотоприймача випромінювання 9 визначається формулою

$$K_9(\omega) = |\text{sinc}(\pi \omega / \omega_{9m})|, \quad (2.40)$$

де ω_{9m} – максимальна просторова частота фотоприймача 9 (цикли/мрад):

$$\omega_{9m} = f' / \delta_n, \quad (2.41)$$

де δ_n – розмір пікселя цифрового фотоприймача 9. Зауважимо, що сучасний рівень мікроелектроніки дозволяє створювати цифрові фотоприймачі з розміром пікселя 2 x 2 мкм.

МПФ $K_{pc}(\omega)$ враховує випадкові лінійні переміщення КШПЗ відносно шуканого об’єкту при русі шасі НРК 3 і скануванні місцевості ППС, а також механічні вібрації при русі

$$K_{pc}(\omega) = K_{\text{лін}}(\omega) K_{\text{віб}}(\omega) K_{\text{вин}}(\omega), \quad (2.42)$$

де $K_{\text{лін}}(\omega)$ – МПФ, яка враховує рух зображення об’єкта на фотоприймачі, $K_{\text{віб}}(\omega)$ – МПФ, яка враховує рух елементів сканування і вплив механічних вібрацій на КШПЗ, $K_{\text{вин}}(\omega)$ – МПФ, яка враховує випадковий рух КШПЗ, елементів її сканування і вплив випадкової механічної вібрації на КШПЗ.

МПФ $K_{\text{вин}}(\omega)$ може бути визначена за формулою [28]:

$$K_{\text{вин}}(\omega) = e^{-2(\pi \sigma_{\text{вин}} \omega)^2}, \quad (2.43)$$

де $\sigma_{\text{вин}}$ – середнє квадратичне відхилення випадкових зміщень. Під випадковими зміщеннями в нашому випадку розуміється зміщення з частотою більше ніж 100 Гц, оскільки зміщення з частотою до 30 Гц око людини встигає відслідковувати, а зміщення з частотою від 30 до 100 Гц враховані в $K_{\text{лін}}(\omega)$ [28].

Якщо відома спектральна щільність потужності вібрації $s(\omega_{\text{віб}})$, то дисперсія випадкових зміщень знаходиться зі співвідношення:

$$\sigma_{\text{вин}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega_{\text{віб}}) d\omega_{\text{віб}}, \quad (2.44)$$

де $S(\omega_{\text{віб}})$ – частота вібрації, мкрад²/Гц, визначається в ході стендових випробувань НРК. Якщо $S(\omega_{\text{віб}})$ не відома, то $\sigma_{\text{вин}}$ приймається рівною (0,2 - 0,5) від кутового розміру пікселя α_n , який визначається як відношення лінійного розміру пікселя δ_n до фокусної відстані об'єктиву 8.

МПФ $K_{\text{кв}}(\omega)$, яка враховує квантування безперервного сигналу в часі, визначається формулами [28]

$$K_{\text{кв}}(\omega) = |\text{sinc}(\pi \omega / \omega_s)|, \quad (2.45)$$

$$\omega_s = k_{\text{кв}} / \alpha_n, \quad (2.46)$$

де $k_{\text{кв}}$ - коефіцієнт квантування, який залежить від структури ППС і визначається відношенням числа вибірок поперек горизонтального кутового розміру поля КШПЗ в просторі предметів до числа пікселів по горизонталі фотоприймача випромінювання 8.

МПФ $K_{11}(\omega)$ фільтра 11, що відновлює, визначається формулою [28]

$$K_{11}(\omega) = [1 + (2 \omega / \omega_s)^{2M}]^{-1/2}, \quad (2.47)$$

де M – порядок фільтра Баттерворта.

МПФ $K_{\text{д}}(\omega)$ дисплею 12 визначається формулою [28]:

$$K_{\text{д}X(Y)}(\omega) = |\text{sinc}(\pi \delta_{\text{д}} \alpha_{X(Y)} \omega / X_{\text{д}}(Y_{\text{д}}) \gamma_{\text{ел}})|, \quad (2.48)$$

де $\delta_{\text{д}}$ – розмір пікселя дисплею, $\alpha_{X(Y)}$ – горизонтальна/вертикальна складова поля зору КШПЗ, $X_{\text{д}}(Y_{\text{д}})$ – лінійні розміри дисплею 12 по горизонталі/вертикалі відповідно.

У випадку виводу зображення КШПЗ на НШІ в формулі (2.33) слід врахувати МПФ колімуючого об'єктиву 15 $K_{15}(\omega)$:

$$K_{15}(\omega) = K_{15\text{д}}(\omega) K_{15\text{а}}(\omega), \quad (2.49)$$

де $K_{15\delta}(\omega)$ – МПФ дифракції колімуючого об’єктиву 15, яка обчислюється за формулою [27]:

$$K_{15}(\omega) = 2 \{ \cos^{-1}(\omega / \omega_{15m}) - (\omega / \omega_{15m}) [1 - (\omega / \omega_{15m})^2]^{1/2} \} / \pi; \quad (2.50)$$

а $K_{15a}(\omega)$ – МПФ аберацій колімуючого об’єктиву 15, яка обчислюється за формулою [27]:

$$K_{15a}(\omega) = 1 - 0,1575 [1 - 4(\omega / \omega_{15m} - 0,5)^2]; \quad (2.51)$$

де ω_{15m} – максимальна просторова частота колімуючого об’єктиву 15 (цикли/мрад), яка розраховується за формулою [27]:

$$\omega_{15m} = D_{15zin} / \lambda, \quad (2.52)$$

де D_{15zin} – діаметр вихідної зіниці колімуючого об’єктиву 15 (мм).

Якщо частота оптичної системи колімуючого об’єктиву 15 $\omega > \omega_{15m}$, то всі МПФ, пов’язані з колімуючим об’єктивом 15 перетворюються на нуль, тобто:

$$K_{15}(\omega) = K_{15\delta}(\omega) = K_{15a}(\omega) = 0. \quad (2.53)$$

МПФ ока оператора 5 $K_5(\omega_5)$ визначається формулою [29]:

$$K_5(\omega_5) = K_{5,zin}(\omega_5) K_{5,cim}(\omega_5) K_{5,mp}(\omega_5), \quad (2.54)$$

де $K_{5,zin}(\omega_5)$ – МПФ зіниці ока оператора 5, $K_{5,cim}(\omega_5)$ – МПФ сітківки ока оператора, $K_{5,mp}(\omega_5)$ – МПФ тремору ока оператора (мікрорухи ока з частотою (30 – 90) Гц).

МПФ $K_{5,zin}(\omega_5)$ зіниці ока оператора 5 можна визначити за формулами [29]:

$$K_{5,zin}(\omega_5) = \exp(-2,504 \omega_5 / f_{5,zin})^{N_{5,zin}}, \quad (2.55)$$

$$f_{5,zin} = \exp(3,663 - 0,0261 D_{5,zin}^2 \log D_{5,zin}), \quad (2.56)$$

$$N_{5,zin} = (0,7155 + 0,277 / D_{5,zin}^{-1/2})^2, \quad (2.57)$$

де $D_{5,zin} = f(L_{14})$ – діаметр зіниці ока 5 в залежності від яскравості L_{14} рідинно-кристалічної матриці 14 кд/м² [29]:

$$D_{5,zin} = -9,011 + 13,25 \exp[-\log(0,292 L_{14}) / 21,082]. \quad (2.58)$$

МПФ $K_{5,cim}(\omega_5)$ сітківки ока оператора 5 визначається формулою [29]:

$$K_{5,cim}(\omega_5) = \exp(-0,01179 \omega_5^{1,215}). \quad (2.59)$$

МПФ $K_{5,mp}(\omega_5)$ тремору ока оператора 5 визначається формулою [29]:

$$K_{5,mp}(\omega_5) = \exp(-0,001458 \omega_5^2). \quad (2.60)$$

Таким чином, МПФ $K(\omega)$ ППС при застосуванні нашоломного індикатора 13 приймає вигляд

$$K(\omega) = K_8(\omega) K_9(\omega) K_{pc}(\omega) K_{кв}(\omega) K_{11}(\omega) K_{д}(\omega) K_{15}(\omega) K_5(\omega_5). \quad (2.61)$$

Необхідно також врахувати, що мікродисплей 14 впливає на зміну контрасту зображення, яке спостерігає оператор. Це можна врахувати коефіцієнтом k_k , який згідно [27] визначається формулою

$$k_k = k_{д} / K_{зін}, \quad (2.62)$$

де $k_{д}$ – коефіцієнт, який враховує властивості мікродисплею 14. Якщо зміни контрасту на мікродисплеї не відбувається, тобто $k_k = 1$, то $k_{дз} = K_{зін}$; якщо контраст на формувачі встановлюється автоматично, то $k_{д} = 0,25$; якщо ж контраст устанавлюється оператором, то $k_{д} = 0,5$.

При виборі поля зору КШПЗ будемо виходити з наступних міркувань. Для того, аби оператор швидко орієнтувався на місцевості – оточуючий простір повинен спостерігатися на дисплеї з реальними кутовими розмірами, і поле зору КШПЗ повинно дорівнювати кутовому розміру дисплею, що спостерігається, тобто $25,6^\circ$ по горизонталі. Якщо в КШПЗ використовується стандартна ПЗЗ-матриця з кроп-фактором 2 (висота $h_{ПЗЗ} = 13,5$ мм і ширина $b_{ПЗЗ} = 18$ мм; розмір пікселю $a_{ПЗЗ} = 11,5$ мкм; розмірність матриці $N_{ПЗЗ} = 1567 \times 1138 \approx 2$ мегапікселів [28]), то фокусна відстань об'єктиву КШПЗ має складати: $f'_1 = b_{ПЗЗ} / 2 \operatorname{tg}(25,6/2)^\circ = 39,6$ мм.

Для забезпечення сприятливих умов роботи ПЗЗ-матриці доцільно використовувати об'єктив з відносним отвором 1:1 (лінійна апертура вхідної зіниці $23,8 \times 31,7$ мм). При таких габаритах дисплею і ПЗЗ-матриці електронне збільшення в КШПЗ складе $6,3^{\times}$. Пошук потенційної цілі в зоні 360° забезпечується 14-ма дискретними положеннями бойового модуля.

Кутова роздільна здатність КШПЗ складе: $\gamma_{кшпз} = a_{пзз} / f_1 = 0,29$ мрад. Тобто кожний піксель ПЗЗ-матриці буде відображатись одним пікселем формувача зображення. У відповідності до критерію Джонсона [29] для виявлення розмитої плями на фоні завад (тобто виявлення цілі) з ймовірністю 50% достатньо, щоб критичний розмір цілі вклався в 1 період еквівалентної міри. Наприклад, для виявлення людини, критичний розмір якої (ширина) становить $l = 0,6$ м, гранична дальність виявлення складе: $L = l f_1 / a_{пзз} = 2000$ м.

Як варіант побудови КШПЗ можна розглядати пристрій для кругового обзору на базі мальтійського хреста [30, 31].

2.5 Побудова камери вузького поля зору

Для того, щоб оператор-стрілець максимально швидко розпізнав ціль на екрані дисплею, поле зору цифрової камери вузького поля зору (КВПЗ) повинно співпадати із зоною чіткого бачення людського ока (central vision zone), що не перевищує $\varnothing 16^\circ$: $12,8^\circ$ по горизонталі і $9,6^\circ$ по вертикалі [4, 9]). Це зона, де при нерухомому оці можна опізнати предмет без розрізнення дрібних деталей. Об'єкти, що знаходяться в зоні ясного бачення, можуть бути легко і швидко переміщені в зону чіткого бачення для подальшого розпізнавання за допомогою стрибків ока. Якщо в КВПЗ використовується стандартна ПЗЗ-матриця з кроп-фактором 4 (висота $h_{пзз} = 6,6$ мм і ширина $b_{пзз} = 8,8$ мм; розмір пікселю $a_{пзз} = 11,5$ мкм; розмірність матриці $N_{пзз} = 765 \times 574 = 439110$ пікселів [32]), то в КВПЗ можна використовувати той самий об'єктив, що і в КШПЗ. При цьому електронне збільшення в КВПЗ складе $8,9^{\times}$. Кутова роздільна здатність КВПЗ складе $0,29$ мрад, а кожний піксель ПЗЗ-матриці буде відображатись чотирма пікселями дисплею.

На рис. 2.11 зображена принципова оптична схема телевізійної камери із спільним об'єктивом 1, ПЗЗ-матрицею КШПЗ 2 і ПЗЗ-матрицею КВПЗ 3. Дзеркало 4 здійснює комутацію ПЗЗ-матриць при обертанні навколо оптичної осі об'єктиву 1 на 180° .

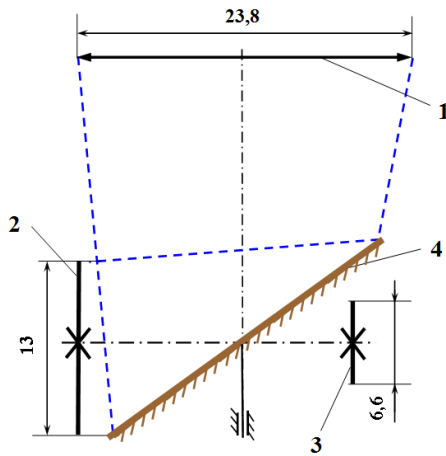


Рисунок 2.11 - Принципова оптична схема КВПЗ із спільним об'єктивом (позначення в тексті)

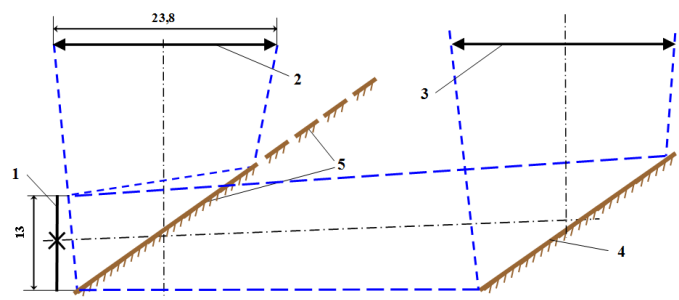


Рисунок 2.12 - Принципова оптична схема КВПЗ із спільною ПЗЗ-матрицею (позначення в тексті)

У відповідності до критерію Джонсона [33] для диференціації об'єкта за приналежністю до типу всередині класу з ймовірністю 50% (тобто розпізнавання цілі) необхідно, щоб критичний розмір цілі вклався в 8 періодів еквівалентної міри. Наприклад, для розпізнавання людини гранична дальність складе: $L = l f_1 / 8 a_{ПЗЗ} = 215$ м. Збільшити цю дальність можна лише за рахунок збільшення фокусної відстані об'єктиву. А збільшити фокусну відстань об'єктиву можливо при використанні ПЗЗ-матриці з меншим кроп-фактором. Наприклад, при використанні в КВПЗ ПЗЗ-матриці з кроп-фактором 2, як і в КШПЗ, фокусна відстань об'єктиву складе: $f'_2 = b_{ПЗЗ} / 2 \operatorname{tg}(12,8/2)^\circ = 80,2$ мм, і дальність розпізнавання людини збільшиться до 436 м. При цьому кутова роздільна здатність КВПЗ збільшиться удвічі і складе 0,14 мрад, а кожний піксель ПЗЗ-матриці буде відображатись одним пікселем дисплею.

На рис. 2.12 зображена принципова оптична схема телевізійної камери із спільною ПЗЗ-матрицею 1, 2 – об'єктив КШПЗ, 3 – об'єктив КВПЗ, 4 – нерухоме дзеркало КВПЗ. Дзеркало 5 здійснює комутацію об'єктивів 2 і 3 шляхом введення/виведення його із структури променів (показані пунктиром), що виходять з об'єктивів. При введеному дзеркалі 5 працює КШПЗ, а при виведеному – КВПЗ.

2.6 Алгоритм роботи оператора НРК

Розглянемо процес вирішення бойової задачі НРК на прикладі оптичної схеми, зображеної на рис. 2.11.

а) Дзеркало 4 займає вихідне положення, при якому об'єктив 1 оптично спряжений з ПЗЗ-матрицею 2. Оптична вісь об'єктиву 1 суміщена з віссю симетрії НРК. При цьому працює КШПЗ, і на дисплеї оператора відображається оточуючий простір при даному положенні бойового модуля в межах поля зору камери і мітка осі її поля зору (наприклад, у вигляді косинця). Оператор управляє з пульта кутовим положенням бойового модуля. При цьому на дисплеї послідовно відображається оточуючий простір навкруги НРК.

б) При виявленні на дисплеї потенційної цілі оператор, використовуючи пульт управління бойовим модулем, суміщає зображення цілі з міткою осі поля зору КШПЗ і одночасно дає команду на комутацію дзеркала 4. При цьому починає працювати КВПЗ, і на дисплеї оператора відображається збільшене зображення цілі 1, мітка 2 осі поля зору КВПЗ і зовнішньобазовий далекомір 3 (рис. 2.13, а). Оператор розпізнає потенційну ціль 1 і приймає рішення щодо подальших дій.

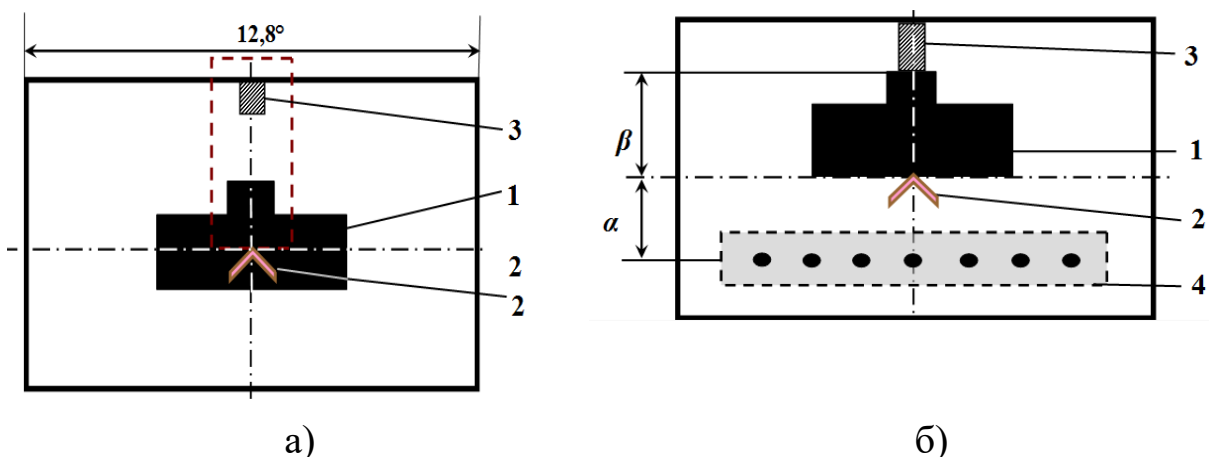


Рисунок 2.13 - Зображення на віддаленому дисплеї оператора (позначення в тексті)

в) Якщо ціль – ворог, оператор вводить в бортовий процесор значення бази B розпізнаної цілі, із використанням пульта управління суміщає низ цілі 1 з міткою 2 осі поля зору КВПЗ і починає

обрамлення цілі 1 зовнішньобазовим далекоміром 3 (рис. 2.13, б). В момент торкання далекоміром 3 верха цілі 1 процесор розраховує дистанцію до цілі 1 за формулою $L = B/tg\beta$ [34], де β – кутовий розмір цілі, що визначається формулою: $tg\beta = (h_{ПЗЗ}/2 - na_{ПЗЗ})/f_1$, де n – кількість пікселів ПЗЗ-матриці, що обрамили ціль 1.

Якщо ціль рухома, то суттєве полегшення процесу обрамлення буде при використанні режиму автоматичного супроводження цілі. Це питання детально розглянуто в книзі [34].

г) Розрахувавши дистанцію до цілі, бортовий процесор визначає кутову поправку $\alpha = F(L)$ на зниження боєприпасу обраного типу зброї (кулемет, гранатомет, тощо) і відображає на дисплеї ряд прицільних міток 4 (рис. 2.13б), що відповідають цьому куту.

д) Далі оператор, використовуючи пульт управління, суміщає зображення цілі з однією з міток відображеного ряду на дисплеї (бокова мітка обирається оператором в залежності від параметрів руху цілі) і дає команду на виконання пострілу зі зброї НРК.

2.7 Конструктивна побудова прицільно-пошукової системи бойового модуля

Сучасні системи протидії наземним роботизованим комплексам примушують розробників звернути пильну увагу на проблему виживання цього виду перспективного озброєння. Сучасні нормативні документи (наприклад, MIL-HDBK-2089 «Military Handbook Aircraft Survivability Terms») трактують виживання як здатність зразка ухилятися або витримувати вплив засобів протидії супротивника без погіршення здатності зразка виконувати поставлену бойову задачу. До життєво важливих систем НРК слід віднести: системи живлення, управління і прицільно-пошукову систему. А до основних факторів, що впливають на виживання цих систем, можна віднести: рівень тактико-технічних характеристик НРК, тактику та сценарії застосування НРК, показники бойової живучості НРК, помітність в основних фізичних полях та кваліфікацію і бойовий досвід оператора

НРК щодо способів застосування роботизованих систем в різних видах бойових дій. Вихід з ладу будь-якої системи НРК унеможлиблює виконання бойової задачі.

Розглянемо питання підвищення живучості ППС НРК, яка може бути виведена з ладу снайперською зброєю супротивника. Для вирішення бойової задачі в склад ППС входять: телевізійна камера широкого поля зору, телевізійний приціл, тепловізійний приціл та лазерний далекомір. На даний момент використовуються дві схеми компоновки бойового модуля. В першій (наприклад, НРК «Ласка», фото 1.1) усі елементи ППС розташовані знизу або зверху зброї в загальному корпусі так, що їхні оптичні осі лежать у горизонтальній площині. В другій (наприклад, НРК «Піранья», фото. 1.2) усі елементи ППС розташовані збоку зброї в спільному корпусі так, що їхні оптичні осі формують трикутник. Це веде до того, що влучання кулі в спільний корпус веде до виводу з ладу усієї ППС.

Для уникнення цього ППС має розміщуватись у двох корпусах 1 і 2, розташованих обабіч зброї 3: в одному – лазерний далекомір 4 та тепловізійний приціл 5, в іншому – камера широкого поля зору 6 та телевізійний приціл 7 [35, 36] (рис. 2.14).

Тоді, при влучанні кулі в один з корпусів, системи іншого будуть здатні виконати бойову задачу з деякими обмеженнями завдяки дієздатному прицілу.

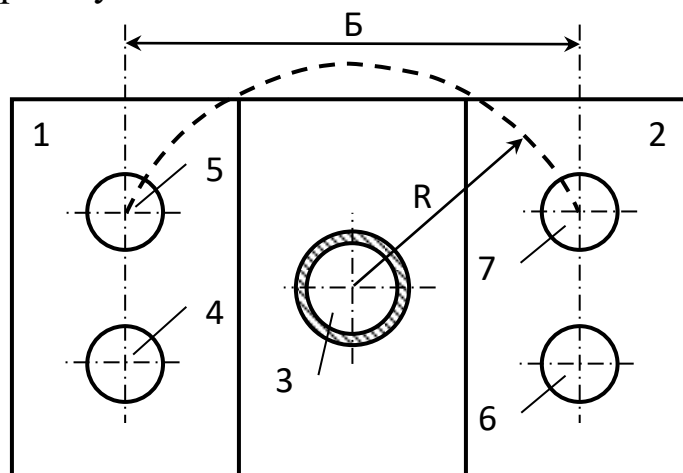


Рисунок 2.14 - Компоновка ППС (позначення в тексті)

Центри вхідних зіниць телевізійного 7 і тепловізійного 5 прицілів доцільно розташувати на радіусі R кола, це спростить процес «холодної пристрілки» зброї. Відстань B між центрами цих зіниць має бути якомога більша, це дасть можливість використовувати параметр B як базу при пасивному вимірюванні дальності до цілі методом внутрішньо-базового далекоміру. Розміщення камери широкого поля зору 6 та телевізійного прицілу 7 в одному корпусі дозволить зменшити габарити корпусу 2 за рахунок схем, розглянутих в підрозділі 2.5.

Побічним ефектом запропонованого технічного рішення, який має самостійне значення, є потенційне розширення функціональності системи. Використання двох корпусів для розміщення інформаційних каналів дозволить в подальшому забезпечити додавання перспективних оптико-електронних чутників. Насамперед це стосується багатоканальних оптико-електронних систем. Підвищення вимог споживачів до виявлювальних можливостей ППС призвело до необхідності використовувати оптико-електронні системи з десятками спектральних каналів замість двох спектральних каналів – телевізійного та тепловізійного [37]. Найближча перспектива передбачає необхідність аналізу не тільки спектральної, але й поляризаційної інформації від фоно-цільової обстановки [38, 39]. Аналіз ступеня поляризації випромінювання дає унікальну можливість відрізнити рукотворні об'єкти від природних. Іноді поляриметрія відбитого та власного випромінювання об'єктів дозволяє чітко виділити замасковані цілі навіть тоді, коли не працюють сучасні гіперспектральні методи виявлення. Важливою особливістю поляризаційних систем є забезпечення високих контрастів зображення малорозмірних цілей на анізотропних фонах. Поляриметричні функції можна надати як тепловізійному, так і телевізійному інформаційному каналам. Поєднання можливостей одночасного виявлення поляризаційних та енергетичних контрастів у вузьких спектральних каналах в одній ППС суттєво підвищує

ефективність дистанційного спостереження. Якщо фізична реалізація спектральної чутливості в системах дистанційного спостереження можлива багатьма шляхами, то поляриметрию можна забезпечити фактично одним з двох способів. Перший полягає в використанні аналізаторів поляризації, що встановлюються в телевізійному або тепловізійному каналі. Другий – в використанні блоку приймача випромінювання з імплементованою поляризаційною чутливістю. Очевидно, що найбільш гнучкий алгоритм виявлення малококонтрастних та замаскованих цілей має передбачати можливість адаптивного до умов спостереження та виду фоно-цільової обстановки конфігурування інформаційних каналів. Найпростішим варіантом технічної реалізації ППС в цьому сенсі були б поляриметричні насадки різних діапазонів спектру, які можна вводити або виводити в/з поля зору основних каналів. Крім того, порівняно з використанням в інфрачервоному каналі поляризаційного тепловізора [40, 41] такий підхід дозволяє залишити високу енергетичну чутливість і забезпечити можливість використання поляриметричної інформації, якщо це є доцільним. Виконання ППС в двохкорпусному варіанті значно полегшує конструкцію з поляриметричними насадками. Питання використання поляризаційного тепловізора розглянуто у підрозділі 2.9.

2.8 Визначення часу виявлення та розпізнавання цілі

Як показано в роботі [42], більшу ймовірність ураження цілі при протистоянні має та сторона X чи Y , яка раніше виявила і розпізнала ціль та почала її обстріл

$$P_{X>Y}(t, \Delta t) = [e^{-x\Delta t} e^{-x(t-\Delta t)} (1 - e^{-y(t-\Delta t)})] / [1 - (1 - e^{-x(t-\Delta t)})(1 - e^{-x(t-\Delta t)} e^{-y(t-\Delta t)})], \quad (2.63)$$

де $P_{X>Y}$ – ймовірність перемоги сторони X над стороною Y , t – тривалість обстрілу, Δt – перевага в часі початку обстрілу однієї із сторін, x і y – потоки пострілів протистояючих сторін X і Y відповідно.

Час виявлення цілі

При участі в протистборстві зі сторони X наземного роботизованого комплексу середнього класу, пошук цілі здійснюється телевізійною камерою широкого поля зору, а розпізнавання – телевізійним прицілом з відображенням інформації на віддаленому дисплеї оператора НРК. Тому часова перевага в початку обстрілу визначається формулою

$$\Delta t = (t_{виявY} + t_{розпY}) - (t_{виявX} + t_{розпX}) \quad (2.64)$$

і залежить не тільки від оптичних характеристик камери і прицілу, але й від досвіду оператора [43], який взаємодіє з віддаленим дисплеєм, де $t_{виявY}$ – час виявлення цілі стороною Y , $t_{виявX}$ – час виявлення цілі стороною X , $t_{розпY}$ – час розпізнавання цілі стороною Y , $t_{розпX}$ – час розпізнавання цілі стороною X .

Проаналізуємо можливість раннього виявлення цілі на екрані віддаленого дисплею, виходячи з теорії випадкового пошуку [1]. При заданій ймовірності виявлення цілі $P_{вияв,j}$ час $t_{вияв,j}$ залежить тільки від коефіцієнта α

$$t_{вияв,j} = -\ln(1 - P_{вияв,j})/\alpha_j, \quad (2.65)$$

який в свою чергу, при інших рівних умовах, залежить від площі зображення об'єкта на дисплеї γ^2 (мін²) і його контрасту K :

$$\lg \alpha_j = -4,3 + 5,6K + 1,6 \lg \gamma_j^2. \quad (2.66)$$

Для визначення параметру γ^2 розглянемо модель телевізійної камери широкого поля зору (рис. 2.15).

Як показано в книзі [1], при пошуку цілі в межах широкого поля, спостерігач в процесі тренування починає діяти за визначеною системою. Він мислено ділить його на зони, в межах яких здійснює випадковий пошук, а перехід від однієї зони до іншої відбувається упорядковано за рядками чи стовбцями. Аби виключити втрати часу на переведення погляду з однієї зони на іншу, при проектування телевізійної камери широкого поля зору необхідно врахувати поле

зору ока, в межах якого досягається задовільна якість зображення, яке за даними [2] становить 30° за кутом місця і 40° – за азимутом.

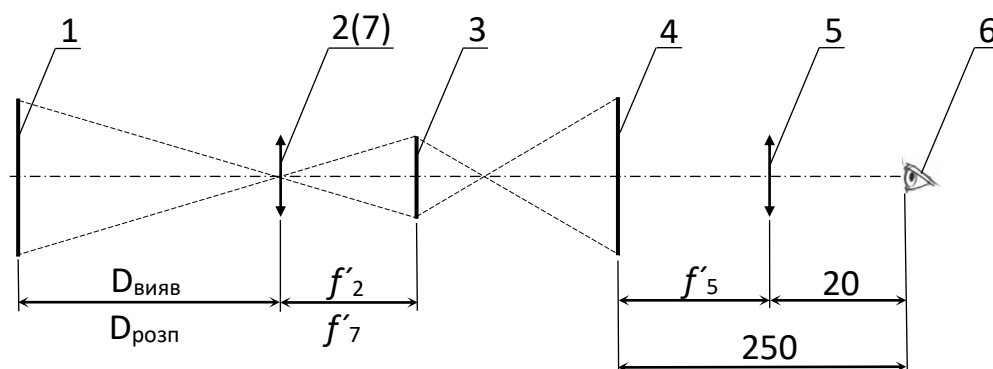


Рисунок 2.15 - Моделі камери широкого поля зору і телевізійного прицілу: 1 – ціль, 2 – об'єктив камери широкого поля зору, 3 – ПЗ3-матриця, 4 – віддалений дисплей (мікродисплей при виводі зображення на нашоломний індикатор), 5 – об'єктив нашоломного індикатора, 6 – око оператора НРК, 7 – об'єктив телевізійного прицілу

Тоді, при відображенні інформації на віддаленому дисплеї 4, що спостерігається з відстані найкращого зору ока людини (250 мм), розміри дисплею не повинні перевищувати 182 мм по горизонталі і 134 мм по вертикалі (діагональ 226 мм = 8,9").

При використанні ПЗ3-матриці середнього розміру (ширина 20,32 мм, висота 15,24 мм, діагональ 0,5", розмір пікселя $a_{ПЗ3} = 2$ мкм) електронне збільшення $\Gamma_{ел}$ в системі відображення інформації визначається відношення діagonalей дисплею та ПЗ3-матриці і становить $8,9"/0,5" = 17,8$ крат.

Для того, щоб оператору НРК було зручно орієнтуватись в просторі, поле зору телевізійної камери широкого поля зору повинно відповідати куту спостереження дисплею, при цьому горизонтальна складова поля зору камери $2\beta_z = 40^\circ$. При ПЗ3-матриці обраного типу фокусна відстань f'_2 об'єктиву 2 телевізійної камери широкого поля зору визначається формулою $f'_2 = 20,32/2tg\beta_z$ і становить 28 мм.

Роздільна здатність R камери широкого поля зору визначається залежністю $R = a_{\text{ПЗЗ}}/f_2$ і становить $0,07$ мрад = $14''$.

При виявленні людини, середні розміри якої становлять $1,67 \times 0,41$ м [4], за критерієм Джонсона з ймовірністю $0,95$ максимальна дальність виявлення $D_{\text{вияв}}$ визначиться за формулою

$$D_{\text{вияв}} = 0,41/MNR, \quad (2.67)$$

де $N = 1$ – кількість періодів еквівалентної міри для виявлення цілі з ймовірністю $0,5$, $M = 2$ – множник для перерахунку ймовірності сприйняття [33].

Підставляючи відомі дані в (2.67), отримуємо $D_{\text{вияв}} = 2928$ м. В цьому разі параметр γ_Y^2 визначається за формулою

$$\gamma_Y^2 = (1,67 \times 0,41)(3440 f_2 \Gamma_{\text{ел}}/250 D_{\text{вияв}})^2$$

і становить $3,7562$ (мін²). Підстановка цього значення в (2.66) дозволяє отримати залежність коефіцієнта α від контрасту K зображення цілі на дисплеї

$$\alpha_Y = 10^{-3,3804+5,6K}. \quad (2.68)$$

Якщо прийняти до уваги ймовірність виявлення цілі $P_{\text{вияв},j} = 0,95$ для успішного виконання бойової задачі стороною X із застосуванням НРК, то формула (2.65) прийме вигляд

$$t_{\text{вияв},X} = 3/10^{-3,3804+5,6K}. \quad (2.69)$$

Як показали останні міжнародні виставки озброєння та військової техніки, нашоломна система індикації, яка була застосована вперше в авіації, знаходить широке застосування і у Сухопутних військах. Переваги такої системи перед віддаленим дисплеєм полягає в тому, що при комплексуванні з системою позиціонування захисного шолома, інформація буде відповідати реальному напряму спостереження в заданих координатах і зберігається перед очима оператора при будь якому довільному положенні його голови [44].

При відображенні інформації на мікродисплеї 4 нашоломного індикатора (рис. 2.15) лінійна апертура об'єктиву 5 має визначатись формулами

$$\text{ширина} = d_{\text{вих.зін}} + 2l \operatorname{tg} \beta_z, \text{ висота} = d_{\text{вих.зін}} + 2l \operatorname{tg} 0,75 \beta_z, \quad (2.70)$$

де за досвідом [45] $d_{\text{вих.зін}} = 8$ мм – діаметр вихідної зіниці нашоломного індикатора, $l = 20$ мм – відстань ока 6 від об’єктива 5.

Підстановка відомих даних в формули (2.70) дає значення ширини об’єктиву (22,6 мм) та висоти (18,7 мм), а умовний діаметр об’єктиву 5 $D_5 = 29,3$ мм. Фокус об’єктиву 5 f_5 визначимо виходячи з критерію добротності Д.С.Волосова [16] для об’єктиву діаметром 29,3 мм і поля зору 50° ($\beta = 25^\circ$)

$$f_5 \geq (D_5 \operatorname{tg} \beta / C_D)^2, \quad (2.71)$$

де $C_D = 2,4$ – критерій добротності об’єктиву за дослідженнями Д.С.Волосова.

Підстановка відомих значень в формулу (2.71) дає результат $f_5 \geq 32,4$ мм. Для мінімізації габаритів нашоломного індикатору приймемо $f_5 = 32,4$ мм. При такому значенні фокуса об’єктива 5 габаритні розміри мікродисплею 4 визначаються формулами

$$\text{ширина} = 2 f_5 \operatorname{tg} \beta_z, \text{ висота} = 2 f_5 \operatorname{tg} 0,75 \beta_z \quad (2.72)$$

і становлять $23,6 \times 17,4$ мм (діагональ $29,3$ мм $= 1,15''$). Останні досягнення мікроелектроніки в області виробництва рідинно-кристалічних мікродисплеїв [11] (наприклад, матриця 8K4K D-ILA має розмір пікселя 4,8 мкм) створюють передумови для створення індикаторів високої роздільної здатності. При такому мікродисплеї електронне збільшення Γ_{el} в системі відображення інформації становить $1,15''/0,5'' = 2,3$ крат.

В цьому разі параметр γ_Y^2 визначається за формулою

$$\gamma_Y^2 = (1,67 \times 0,41) (3440 f_2 \Gamma_{el} / f_5 D_{\text{вияв}})^2$$

і становить 3,7338 (мін²). Підстановка цього значення в (2.66) дозволяє отримати залежність коефіцієнта α від контрасту K зображення цілі на мікродисплеї:

$$\alpha_Y = 10^{-3,3846+5,6K}. \quad (2.73)$$

При прийнятій ймовірності виявлення цілі $P_{вияв,j} = 0,95$ формула (2.65) приймає вигляд:

$$t_{вияв,X} = 3/10^{-3,3846+5,6K}. \quad (2.74)$$

Аналізуючи залежності (2.69) і (2.74), можна зробити висновок, що час виявлення цілі на екрані віддаленого дисплею в деякій мірі менше часу виявлення цілі на нашоломному індикаторі. Перевага в часі виявлення $\Delta t_{вияв,X}$ визначається залежністю

$$\Delta t_{вияв,X} = 70/10^{5,6K}.$$

З цієї формули видно, що при $K \rightarrow 0$: $\Delta t_{вияв,X} \rightarrow 70$ і при $K \rightarrow 1$: $\Delta t_{вияв,X} \rightarrow 0$. А це означає, при великому контрасті цілі варіанти відображення інформації рівноцінні, а при малому контрасті цілі перевагу має варіант відображення інформації на віддаленому дисплеї.

Звідси, враховуючи інші переваги нашоломного індикатору, можна зробити перший висновок – при виявленні цілі за допомогою камери широкого поля зору інформацію необхідно відображати і на віддаленому дисплеї, і на нашоломному індикаторі. Оператор сам буде обирати зображення, візуально оцінюючи його якість.

Час розпізнавання цілі

Проаналізуємо можливість раннього розпізнавання цілі на екрані віддаленого дисплею, виходячи з теорії випадкового пошуку. Як було сказано вище, розпізнавання цілі здійснюється оператором із використанням телевізійного прицілу. Структурна схема телевізійного прицілу аналогічна схемі камери широкого поля зору, зображень на рис. 2.15, де індекс 7 позначає об'єктив телевізійного прицілу. При виборі поля зору телевізійного прицілу НРК можна виходити з таких міркувань.

При розпізнаванні людини, середні розміри якої становлять $1,67 \times 0,41$ м, за критерієм Джонсона з ймовірністю 0,95 максимальна дальність розпізнавання $D_{розп}$ визначиться за формулою (2.67), де

$N = 8$ – кількість періодів еквівалентної міри для розпізнавання цілі з ймовірністю 0,5, а $M = 2$ – множник для перерахунку ймовірності сприйняття [33].

При ПЗЗ-матриці обраного типу фокусна відстань f_7 об'єктиву 7 телевізійного прицілу визначається формулою $f_7 = 20,32/2\text{tg}\omega_z$, де $2\omega_z$ - горизонтальна складова поля зору телевізійного прицілу.

Для того, щоб оператор НРК виявив ціль на максимальній дальності ($D_{\text{вияв}} = 2928$ м) і розпізнав її на тій самій дальності, необхідно виконати умову

$$f_7 = 16 D_{\text{вияв}} \cdot a_{\text{ПЗЗ}}/0,41. \quad (2.75)$$

Такий підхід обґрунтований тим, що виявивши ціль на великій дальності, НРК не завжди матиме можливість наблизитись до цілі задля її розпізнавання, саме тому доцільно прийняти $D_{\text{вияв}} = D_{\text{розп.}}$.

Підставляючи в (2.75) відомі значення, знаходимо $f_7 = 228,5$ мм. З урахування цього $2\omega_z = 5,1^\circ$, а розрізнявальна здатність R телевізійного прицілу визначається залежністю $R = a_{\text{ПЗЗ}}/f_7$ і становить $0,009$ мрад $= 1,75''$.

В цьому разі параметр $\gamma\gamma^2$ при відображенні інформації на віддаленому дисплеї становитиме 250,15 (мін²). При прийнятій ймовірності розпізнавання цілі $P_{\text{розп.},j} = 0,95$ формула (2.65) приймає вигляд

$$t_{\text{розп.},X} = 3/10^{-0,4629+5,6K}. \quad (2.76)$$

При відображенні інформації на мікродисплеї 4 нашоломного індикатора (рис. 2.15) параметр $\gamma\gamma^2$ становитиме 248,66 (мін²). При прийнятій ймовірності розпізнавання цілі $P_{\text{розп.},j} = 0,95$ формула (2.65) приймає вигляд

$$t_{\text{розп.},X} = 3/10^{-0,467+5,6K}. \quad (2.77)$$

Аналізуючи залежності (2.76) і (2.77), можна зробити висновок, що час розпізнавання цілі на екрані віддаленому дисплеї в деякій мірі менше часу виявлення цілі на нашоломному індикаторі. Перевага в часі розпізнавання $\Delta t_{\text{розп.},X}$ визначається залежністю

$$\Delta t_{розн,X} = 0,0826/10^{5,6K}.$$

З цієї формули видно, що при $K \rightarrow 0$: $\Delta t_{розн,X} \rightarrow 0,0826$ і при $K \rightarrow 1$: $\Delta t_{розн,X} \rightarrow 0$. А це означає, що обидва варіанти відображення інформації практично рівноцінні.

Звідси можна зробити другий висновок – при розпізнавання цілі за допомогою телевізійного прицілу інформацію можна відображати на віддаленому дисплеї або на нашоломному індикаторі.

Підставляючи вирази (2.69) і (2.76) або (2.74) і (2.77) в (2.64), знаходимо вирази для розрахунку часу виявлення і розпізнавання людини на дистанції 2928 м стороною X із застосуванням віддаленого дисплею НРК або нашоломного індикатора в залежності від контрасту цілі:

$$(t_{виявX} + t_{рознX}) = 7212 \times 10^{-5,6K}; (t_{виявX} + t_{рознX}) = 7282 \times 10^{-5,6K}.$$

Вочевидь, що такий самий підхід можна застосувати для оцінки часу виявлення і розпізнавання будь якої цілі при відомому значенні її критичного розміру.

Для оцінки складової ($t_{виявY} + t_{рознY}$) в формулі (2.64) необхідно знати критичний розмір НРК сторони X , що протистоїть стороні Y .

2.9 Використання поляризаційного тепловізора

2.9.1 Обґрунтування поляризації власного теплового випромінювання

В загальному випадку поляризація власного випромінювання матеріалів виникає з-за явищ відбиття і заломлення на межі «середовище-повітря», що описується законом Френеля для металів і діелектриків [46]. При цьому ступінь поляризації власного випромінювання поверхні підвищується при збільшенні кута ψ між напрямком випромінювання і нормаллю до поверхні випромінювання. Розглянемо процес формування власного випромінювання елемента dA поверхні об'єкту, його енергетичні і поляризаційні характеристики (рис. 2.16)

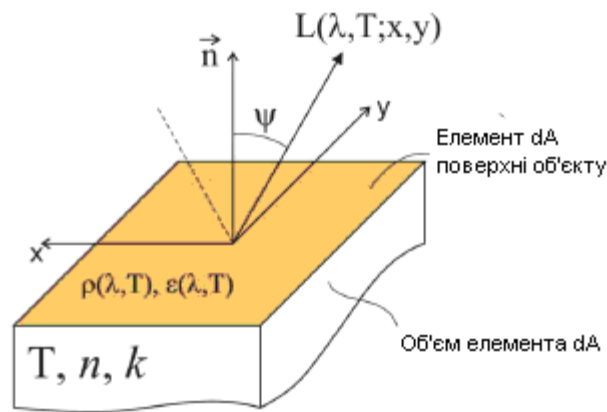


Рисунок 2.16 - Схема поляризації власного випромінювання елемента поверхні об'єкту: n і k - дійсна і уявна частина комплексного показника заломлення матеріалу елемента dA , $\vec{n}$ - нормаль елемента dA , T - абсолютна температура поверхні, а $\rho(\lambda, T)$, $\alpha(\lambda, T)$, $\varepsilon(\lambda, T)$ - відповідно коефіцієнти відбиття, поглинання і випромінювання поверхні

Енергетична яскравість $L(\lambda, T; x, y)$ власного випромінювання, яке реєструється матричним приймачем оптичного випромінювання, миттєве поле зору якого відповідає розмірам елемента dA , описується законом Кірхгофа [47]

$$L(\lambda, T; x, y) = \varepsilon(\lambda, T; x, y) \varepsilon(\psi) W^\circ(\lambda, T).$$

Згідно до цього закону власне випромінювання об'єкту спостереження формується трьома факторами: коефіцієнтом випромінювання $\varepsilon(\lambda, T; x, y)$, який залежить від температури T і постійних матеріалу n і k ; індикатрисою випромінювання $\varepsilon(\psi)$ та безпосереднім випромінюванням об'єму тіла $W^\circ(\lambda, T)$, яке описується формулою Планка для світимості абсолютно чорного тіла з температурою T

$$W^\circ(\lambda, T) = C_1 [\lambda^5 \exp(C_2 / \lambda T) - 1]^{-1},$$

де $C_1 = 3,74 \cdot 10^4$ Вт мкм⁴/см², $C_2 = 1,438 \cdot 10^4$ мкм К.

Відповідно до закону збереження енергії для непрозорих конструктивних матеріалів і середовищ і з врахуванням балансу $\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$ коефіцієнти $\varepsilon(\lambda, T)$ і $\rho(\lambda, T)$ зв'язані рівнянням [48]

$$\varepsilon(\lambda, T) = 1 - \rho(\lambda, T).$$

Що стосується поляризаційних властивостей, то ступінь поляризації випромінювання P_ψ визначає різницю коефіцієнтів випромінювання об'єкта для складових цього випромінювання $\varepsilon_{||}$ і $\varepsilon_{\perp}$, поляризованих відповідно в площині його виходу з поверхні об'єкта і перпендикулярно до неї. У кінцевому вигляді ступінь поляризації власного випромінювання елемента dA поверхні описується формулою [49]

$$P_\psi = [L_{||}(\lambda, T; x, y) - L_{\perp}(\lambda, T; x, y)] / [L_{||}(\lambda, T; x, y) + L_{\perp}(\lambda, T; x, y)]. \quad (2.78)$$

Енергетична яскравість елемента поверхні об'єкта, що спостерігається, для паралельної $L_{||}(\lambda, T; x, y)$ і перпендикулярної $L_{\perp}(\lambda, T; x, y)$ складової випромінювання визначається формулами [47]

$$L_{||}(\lambda, T; x, y) = \varepsilon_{||}(\lambda, T; x, y) W^\circ(\lambda, T) / \pi. \quad (2.79)$$

$$L_{\perp}(\lambda, T; x, y) = \varepsilon_{\perp}(\lambda, T; x, y) W^\circ(\lambda, T) / \pi. \quad (2.80)$$

Підставивши вирази (2.79) і (2.80) в формулу (2.78), отримуємо:

$$P_\psi = (\varepsilon_{||} - \varepsilon_{\perp}) / (\varepsilon_{||} + \varepsilon_{\perp}). \quad (2.81)$$

Значення $\varepsilon_{||}$ і $\varepsilon_{\perp}$ для непрозорих конструктивних матеріалів визначаються за формулами Френеля

$$\varepsilon_{||} = 4n \cos \psi / [(n \cos \psi + 1)^2 + k^2 \cos^2 \psi], \quad (2.82)$$

$$\varepsilon_{\perp} = 4n \cos \psi / [(n + \cos \psi)^2 + k^2]. \quad (2.83)$$

Підставивши вирази (2.82) і (2.83) в формулу (2.81), після перетворень отримуємо вираз для ступеня поляризації власного теплового випромінювання елемента поверхні dA для кута ψ :

$$P_\psi = [(n^2 + k^2 - 1) \sin \psi] / [(n^2 + k^2 + 1)(\cos^2 \psi + 1) + 4n \cos \psi]. \quad (2.84)$$

Як видно з (2.84), ступінь поляризації суттєво залежить від показників n і k . Наприклад, у діелектриків $k \ll 1$, а $1 < n < 2$, і ступінь поляризації слабкіша, чим у металів, у яких $(n^2 + k^2) \gg 1$ [49]. Також відмітимо, що P_ψ залежить також від стану поверхні, яка випромінює. Як показано в дослідженні [50], ступінь поляризації власного теплового випромінювання металів, сплавів і конструктивних матеріалів досить стабільна при зміні температури, слабо залежить від довжини хвилі в діапазоні (2 - 10) мкм і зберігає своє значення навіть у грубо оброблених поверхнях. Звідси витікає важливий

висновок – ступінь поляризації власного теплового випромінювання металевих цілей та її кутова індикатриса $P_\psi = f(\psi)$ є дуже інформативними демаскуючими ознаками при виділенні цілей на слабо поляризованому природному фоні.

2.9.2 Апаратура визначення тримірної форми цілі

Для отримання тримірного теплового зображення цілі на екрані відео-контрольного пристрою необхідно виконати наступні операції:

- порядкове і покадрове сканування поверхні цілі за рахунок зміни кутового положення оптичної осі тепловізора;
- поляризацію оптичного тепловізійного сигналу за допомогою лінійного інфрачервоного (ІЧ) поляризатора;
- перетворення оптичного сигналу в електричний за допомогою матричного приймача випромінювання (ПВ);
- формування ряду поляризаційних тепловізійних зображень з азимутами поляризації в діапазоні $(0 - 180)^\circ$ за рахунок обертання лінійного ІЧ поляризатора;
- визначення форми цілі за формулами на основі значень отриманих відеосигналів кожного елементу розкладу кадру;
- відображення кадру на відео-контрольному пристрої (ВКП).

На рис. 2.17 зображена блок-схема тепловізора для реалізації цих операцій.

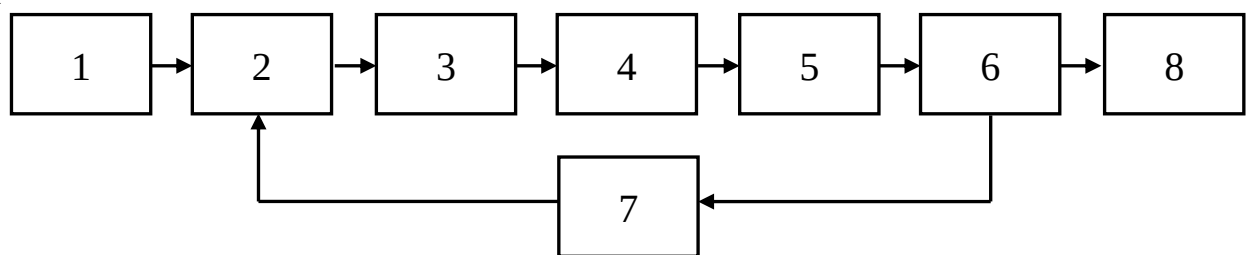


Рисунок 2.17 - Блок-схема тепловізора: 1 – телескопічна система, 2 – лінійний ІЧ поляризатор, 3 – конденсор, 4 – ПВ, 5 – блок попередньої обробки, 6 – блок електронної обробки, 7 – блок управління ІЧ поляризатором, 8 - ВКП

По перше, кут нахилу кожного елементу відносно напрямку спостереження $\psi(N,K)$, де N – номер рядку в кадрі, K – номер елементу в рядку, можна визначити по чотирьом тепловізійним зображенням з азимутами поляризації t_n : 0° , 45° , 90° і 135° . Для цього лінійний ІЧ поляризатор 2 встановлюється з можливістю обертання навколо оптичної осі телескопічної системи 1 на кути 0° , 45° , 90° і 135° .

Якщо азимут ІЧ поляризатора 2 $t_n=0^\circ$, то на виході ПВ 4 за кадр формується $N \times K$ відеосигналів $U_0(N,K)$. Аналогічно формуються відеосигнали $U_{45}(N,K)$ при $t_n=45^\circ$, $U_{90}(N,K)$ при $t_n=90^\circ$ і $U_{135}(N,K)$ при $t_n=135^\circ$ від усіх елементів розкладення тепловізійного кадру. В блоці 5 всі ці чотири кадри запам'ятовуються, і в блоці 6 інформація обробляється та на екрані ВКП відображається тримірна форма поверхні цілі, що спостерігається [51]. При цьому тримірна геометрія форми цілі всередині теплового контуру визначається за формулою

$$\psi(N,K) = \arccos(1 - M_1/M_2),$$

в якій

$$M_1 = [U_0(N,K) - U_{90}(N,K)] / [U_0(N,K) + U_{90}(N,K)],$$

$$M_2 = a \cos\{\arctg[U_{45}(N,K) - U_{135}(N,K)] / [U_0(N,K) - U_{90}(N,K)]\},$$

a – константа, яка залежить від матеріалу і шорсткості поверхні цілі.

Таким чином, по чотирьом поляризаційним тепловізійним зображенням можна визначити кут нахилу $\psi(N,K)$ кожного елемента поверхні цілі по відношенню до напрямку спостереження. Тоді для довільної лінії сканування поверхні цілі шукані рівняння форми поверхні можна записати у вигляді:

$$x(N,K)|_{y=const} = z(N,K) \operatorname{tg} \psi(N,K), \quad (2.85)$$

$$x(N,K)|_{z=const} = y(N,K) \operatorname{tg} \psi(N,K), \quad (2.86)$$

де x (глибина); y, z – декартові координати точок на поверхні цілі.

По друге, з метою скорочення часу на обробку інформації в блоці 6 кут нахилу кожного елементу відносно напрямку спостереження $\psi(N,K)$, можна визначити по трьом тепловізійним зображенням з азимутами поляризації t_n : 0° , 60° і 120° . Для цього лінійний ІЧ поляризатор 2 встановлюється з можливістю обертання навколо оптичної осі телескопічної системи 1 на кути 0° , 60° і 120° [52].

В цьому разі тримірна геометрія форми цілі всередині теплового контуру визначається за формулами (2.85) і (2.86) при

$$\psi(N,K) = \arccos(1-M_3M_4),$$

в якій

$$M_3=3[U_{60}(N,K) - U_{120}(N,K)]/a[U_0(N,K) + U_{60}(N,K)],$$

$$M_4=1/\sin\{\arctg[3(U_{60}(N,K) - U_{120}(N,K))/[2U_0(N,K) + U_{60}(N,K) + U_{120}(N,K)]]\}.$$

По третє, з метою подальшого скорочення часу на обробку інформації в блоці 6 кут нахилу кожного елементу відносно напрямку спостереження $\psi(N,K)$, можна визначити по двом тепловізійним зображенням з азимутами поляризації t_n : 45° і 90° . Для цього ІЧ поляризатор 2 виконується у вигляді послідовно розміщених чвертьхвильової пластинки з кутом орієнтації швидкої осі 45° і лінійного ІЧ поляризатора [53].

В цьому разі тримірна геометрія форми цілі всередині теплового контуру визначається за формулами (8) і (9) при [49]

$$\psi(N,K) = \arccos[1-(M_5/M_6)^{1/2}/a],$$

в якій

$$M_5=U_{45}(N,K) - 1,$$

$$M_6=2 \sin\{\arctg[(U_{45}(N,K) - 1)/(1-U_{90}(N,K))-(U_{45}(N,K) - 1)]\},$$

$U_{45}(N,K)$ і $U_{90}(N,K)$ – значення відеосигналів поляризаційних зображень з азимутами поляризації 45° і 90° .

По четверте, визначити форму цілі в реальному часі можна на основі одного поляризаційного зображення. Для цього ІЧ поляризатор 2 в блок-схемі на рис. 2 також виконується у вигляді послідовно розміщених чвертьхвильової пластинки з кутом орієнтації швидкої осі 45° і лінійного ІЧ поляризатора з азимутом t_n 0° [10]. Як відомо, їхні матриці пропускання мають вигляд відповідно

$$\tau_{i,j} = \tau_{\lambda/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \tau_{i,k} = \tau_n \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

де $\tau_{\lambda/4}$ і τ_n – коефіцієнти пропускання чвертьхвильової пластинки і лінійного поляризатора відповідно. В цьому випадку поляризаційне

зображення не має властивостей класичної термограми, а вектор-параметр Стокса Φ_k для потоку випромінювання комбінованого поляризатора має вигляд [11]

$$\Phi_k = \sum_{i=1}^4 \tau_{i,k}^{(2)} \sum_{j=1}^4 \tau_{i,j}^{(1)} \Phi_i, \quad k = 1, 2, 3, 4,$$

де Φ_i - потік власного випромінювання цілі.

Оскільки перший елемент вектора-параметра Стокса теплового випромінювання Φ_k , що пройшло комбінований поляризатор, характеризує енергетичний потік теплового випромінювання цілі, то вихідний сигнал ПВ 4 можна представити у вигляді

$$U_0(N,K) = \Phi_{k=1} S = S \tau_o \Phi \tau_{\lambda/4} \tau_n [1 - P_\psi(N,K) \sin 2\gamma],$$

де S – чутливість ПВ, τ_o – пропускання оптики, а γ – показник еліптичності теплового випромінювання: $\operatorname{tg} \gamma = \varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}$, який визначається за допомогою формул (5) і (6).

В цьому разі тримірна геометрія форми цілі всередині теплового контуру визначається формулами [4]

$$x(N,K)|_{z=\text{const}} = x(N-I,K) + \Delta y(N,K) \operatorname{tg} \psi(N,K),$$

$$x(N,K)|_{y=\text{const}} = x(N,K-I) + \Delta z(N,K) \operatorname{tg} \psi(N,K),$$

де кут ψ визначається формулою

$$\psi = \arccos[1 - 0,67 M_7^{1/6} \cos(0,33 \arctg M_8) / a + M_9],$$

в якій

$$M_7 = [18(1-U_0) + (1-U_0)^3]^2 - [(1-U_0)^4 + 11(1-U_0) - 1]^2,$$

$$M_8 = [(1-U_0)^4 + 11(1-U_0) - 1] / [18(1-U_0) + (1-U_0)^3],$$

$$M_9 = (1-U_0) / 3a.$$

Особливість роботи тепловізора в цьому варіанті його виконання полягає в наступному. Блок електронної обробки 6 обчислює декартові координати усіх N , K елементарних площадок на поверхні цілі. Дві декартові координати y і z елементів поверхні визначаються розмірами теплового зображення цілі, а розрахунок координат x здійснюється завдяки залежності ступеня поляризації P_ψ теплового випромінювання кожного елемента зображення цілі від кута орієнтації ψ її елементарної площадки, що випромінює, відносно напрямку її спостереження і передаються на ВКП 8.

На рис. 2.18 показані термограми предмету у вигляді конуса у класичному виконанні і при використанні поляризаційного тепловізора [4].

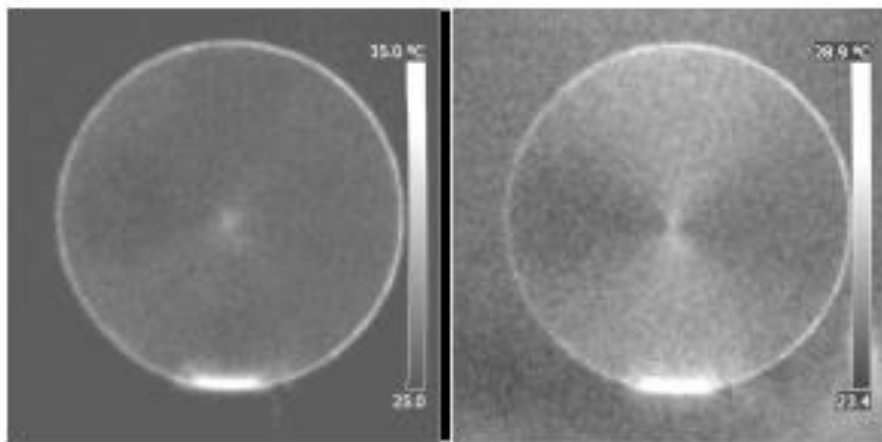


Рисунок 2.18 - Приклад класичного (ліворуч) і поляризаційного (праворуч) тепловізійного зображення нагрітого предмету у вигляді конуса

Висновки

1. Параметри системи відображення інформації НРК, що пов'язані із бойовою задачею, залежать від характеристик людського ока, характеристик формувача зображення і варіанту розміщення формувача зображення: на робочому місці оператора або на захисному шоломі/голові.
2. При розміщенні системи відображення інформації на захисному шоломі/голові необхідно використовувати колімуючу оптику. При обранні типу оптичної схеми (рефракторна, рефлекторна, голографічна) треба враховувати задачі НРК і тип захисного шолому.
3. В якості мікродисплею нашоломного індикатора доцільно використовувати OLED стандартного формату 3:4.
4. Основні характеристики камери широкого поля зору залежать від модуляційних передавальних функцій її складових.
5. Для підвищення живучості ППС і забезпечення можливості функціонального нарощування її спроможностей доцільно розміщувати ППС у двох окремих корпусах, розташованих обабіч зброї.

6. Зображення, сформовані камерою широкого поля зору і телевізійним прицілом наземного роботизованого комплексу, повинні виводитись одночасно на віддалений дисплей і на нашоломний індикатор для зручності сприйняття інформації оператором НРК.
7. Використання явища поляризації при розробці ППС НРК слід розглядати як перспективний напрямок підвищення ефективності комплексу.

Література до розділу 2

1. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов / *Мирошников М.М.* // Л-д: «Машиностроение», 1977. – 600 с.
2. Дж. Ллойд. Системы тепловидения / Дж. Ллойд.//М.: Издательство «Мир», 1978. – 414 с.
3. *Artal, P.* The human eye is an example of robust optical design. / *Artal, P., Benito, A. & Tabernero, J.* // J. of Vision. No 6(1). 2006. Pp. - 17. DOI: 10.1167/6.1.1.
4. Справочник конструктора оптико-механических приборов; под ред. Кругера М.Я. и Панова В.А. Л.: Машиностроение. 1967. 760 с.
5. *Мухин И.А.* Современные плоскопараллельные отображающие устройства / *Мухин И.А* // Телевидение и радиовещание. № 1(37). 2004 р., с. 43-47.
6. *Мельник О.Д.* Перспективна нашоломка система індикації / *В.М.Сенаторов, О.Д.Мельник* // Тези доповідей 16-ї міжнародної наукової конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору», Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 15-16 квітня 2020 р., с.235-236.
7. Гигиена труда в танковых и мотострелковых частях. Електронний ресурс. Режим доступу https://studopedia.ru/1_56763_gigiena_truda_v_tankovih_i_motostrelkovih_chastyah.html. Дата звернення 13.06.2022.

8. Кулагин С.В. Проектирование фото- и кино-приборов / Кулагин С.В., Апарин Е.М. // М.: "Машиностроение", 1986.- 280 с.
9. Чиж І.Г. Автоматизована об'єктивна рефрактометрія ока з визначенням обсягу псевдо акомодатії (монографія)/ Чиж І.Г., Сенаторов В.М., Голембовський О.О. //Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2020. – 120 с.
10. Сенаторов В.Н. Решение задачи скрытого прицеливания стрелкового оружия с помощью телевизионного прицела / Сенаторов В.Н., Борисюк А.А., Четырин С.П. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Межд. науч.-техн. журнал. – Киев: КБ АВ. – 2007.- № 1(22)/2007.- с. 9-12.
11. JVC Develops 1.75 inch 8K4K D-ILA Device. Електронний ресурс. Режим доступу www.jvc-victor.co.jp. Дата звернення 13.06.2022.
12. OLED-дисплей. Електронний ресурс. Режим доступу <https://hi-news.ru>>Темы>Это интересно. Дата звернення 13.06.2022.
13. TMOS-дисплеи составят конкуренцию OLED и ЖК в 2010 году. Електронний ресурс. Режим доступу <https://3dnews.ru/581518>. Дата звернення 13.06.2022.
14. Что такое LCD TFT дисплей. Современные технологии. Електронний ресурс. Режим доступу [www.techno-guide.ru>informatsionnye-tekhnologii/displei/osobennosti-lcd-tft-tekhnologii-displeev.html](http://www.techno-guide.ru/informatsionnye-tekhnologii/displei/osobennosti-lcd-tft-tekhnologii-displeev.html). Дата звернення 13.06.2022.
15. Бородин В.Т. Пилотажные комплексы и системы управления самолетов и вертолетов. / Бородин В.Т., Рыльский Г.И. // М.: «Машиностроение», 1978. – 215 с.
16. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. / Волосов Д.С. // М.: «Искусство», 1971. – 670 с.
17. Кучерявый А.А. Бортовые информационные системы. Курс лекций Под ред. В.А. Мишина и Г.И. Ключева. / Кучерявый А.А. // 2-е изд. перераб. и доп. - Ульяновск УлГТУ, 2004. - 504 с.

18. ОСТ 100345-87. Система отображения информации в кабинах экипажа. Общие эргономические требования. М., 1987. - 17 с.
19. *Сенаторов В.Н.* Оптимизация коэффициентов светопропускания зеркал в менисковом коллиматорном визире / Сенаторов В.Н., Полежаев В.В. // Оптико-механическая промышленность. - 1979.- № 8.- с. 59-60.
20. А.с. 1578683 (СССР). Способ увеличения информационного поля зрения в коллиматорном визире. Авторы Сенаторов В.Н., Полежаев Д.В., Липунова В.Г. БИ №26, 1990.
21. *Сенаторов В.Н.* Увеличение поля зрения в широкоугольной системе отображения информации / Сенаторов В.Н., Романовский В.А. // Оптический журнал, № 2, 1992. – с. 61–62.
22. Headgear display system using off-axis image sources. Пат. США № 5576887 від 19.11.1996 р., МПК G02B 27/0172.
23. High brightness see-through head-mounted display. Пат. США № 6147807 від 14.11.2000 р., МПК G02B 27/14.
24. Новые тенденции в развитии систем отображения информации и управления боевых самолетов (Обзор по материалам иностранной печати), под общ. ред. Федосова Е.А. - М.: Научно-информационный центр, 1984. – 62 с.
25. *Ган М.А.* Теория и методы расчета оптических систем с голографическими оптическими элементами / Ган М.А. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – СПб: ГОИ им. С.И.Вавилова. – 1992. – 32 с.
26. *Сенаторов В.Н.* Авиационные стрелковые прицелы и пилотажно-прицельные индикаторы / Сенаторов В.Н., Полежаев В.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Межд. науч.-техн. журнал. – Киев: КБ АВ. – 2008.- № 1(26)/2008. – с. 30–34.
27. *Vollmerhausen R.H.* The Targeting Task Performance (TTP) Metric A New Model for Predicting Target Acquisition Performance / Vollmerhausen, R.H., E. Jacobs // Modeling and Simulation Division

Night Vision and Electronic Sensors Directorate U.S. Army CERDEC
Fort Belvoir, VA 22060.

28. *Holst G.C.* Electro-Optical Imaging System Performance – 5th edition / Holst G.C. // JCD Publishing & SPIE Press.- 2008. – 150 p.
29. *Barten P. G. J.* Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality / Barten P.G.J. (SPIE Press Book). 1999. – 120 p.
30. Патент на корисну модель № 127063 (Україна). Пристрій для кругового сканування. Автори Чепков І.Б., Сенаторов В.М., Мельник О.Д. – 2018. – Бюл. № 13.
31. *Сенаторов В.М.* Сучасний стан і перспективи розвитку систем кругового огляду для військової техніки / Сенаторов В.М., Довгополий А.С., Гусляков О.М. // Озброєння та військова техніка: Науково-технічний журнал. - Київ: ЦНДІ ОБТ ЗСУ. – 2018. -№ 3(19) 2018.- с. 9-14. doi: [https://doi.org/10.34619/2414-0651.2018.3\(19\).9-14](https://doi.org/10.34619/2414-0651.2018.3(19).9-14).
32. *Носов Ю.Р.* Основы физики приборов с зарядовой связью / Носов Ю.Р., Шилин В.А. // М.: Наука. 1986. - 318 с.
33. *Жердев М.К.* Применение тепловизоров для решения специальных задач / Жердев М.К., Креденцер Б.П., Кузавкин В.В. // Коммуникации и сети. Телеком. Октябрь 2017. Спец. выпуск. с. 32-36.
34. *Кулагин С.В.* Оптико-механические приборы. / Кулагин С.В., Дикарев В.Н., Мосягин Г.М. // М.: Машиностроение. 1975. – 400 с.
35. *Микитенко В.І.* Підвищення живучості прицільно-пошукової системи наземного роботизованого комплексу / В.І. Микитенко, В.М. Сенаторов, О.Д. Мельник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». – 2021. – № 61(1) (2021). – с.26–31.
36. Патент на корисну модель № 151939 (Україна). Бойовий модуль наземного роботизованого комплексу. Автори Гультяєв А.А., Довгополий А.С., Кириченко І.В. та ін. – 2022. – Бюл. № 40.
37. *Попов П.Г.* Метод локальных анизотропных признаков и его применение в комплексированных системах автосопровождения:

- автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук / Попов П.Г. // Новосибирский гос. техн. ун-т. 1998. - 39 с.
38. Колобродов В.Г. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження (монографія) / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // К.: «Аверс», 2013. – 178 с.
39. Sumera Sattar. "Review of spectral and polarization imaging systems" / Sumera Sattar, Pierre-Jean Lapray, Alban Foulonneau, Laurent Bigué // Proc. SPIE 11351, Unconventional Optical Imaging II, 113511Q (13 April 2020).
40. Huijie Zhao. Comparing analysis of multispectral and polarimetric imaging for mid-infrared detection blindness condition / Huijie Zhao, Yansong Li, Guorui Jia and etc. // Applied Optics. Vol. 57, Issue 24, pp. 6840-6850. (2018).
41. «Wavelength- or Polarization-Selective ThermalInfrared Detectors for Multi-Color or PolarimetricImaging Using Plasmonics and Metamaterials», Shinpei Ogawa and Masafumi Kimata. [Електронний ресурс] Режим доступу: Дата звернення 13.06.2022.
42. Круковский-Синеви́ч К.Б. Вероятностная модель огневого противоборства сторон / Круковский-Синеви́ч К.Б., Гурнович А.В. //Артиллерийское и стрелковое вооружение. Вип. 5, 2002. – с. 14–16.
43. Volodymyr Senatorov. Influence of human factor on combat effectiveness of small arms firing operations with optical sight /Volodymyr Senatorov, Mykola Bilokur, Olexander Melnyk// Issues of armament technology. Scientific Bulletin of Military Institute of Armament Technology, Poland. №1/2020, Volume 153, 2020. – P.55–64. DOI: 10.5604/01.3001.0014.2711.
44. Сенаторов В.М. Застосування нашоломної системи індикації у Сухопутних військах // Сенаторов В.М., Сенаторов М.В. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗСУ. № 4(24). 2019. с. 71-77. DOI: 10.34169/2414-0651.2019.4(24). – с.71–77.
45. Сенаторов В.М. Доповнена реальність в техпроцесі ремонту бронетанкової техніки / Сенаторов В.М., Колотухін Є.А. // «Інтеграція

інформаційних систем і інтелектуальних технологій в умовах трансформації інформаційного суспільства». Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції. Полтавський державний аграрний університет, 21-22 жовтня 2021. – с. 122-127.

46. *Борн М.* Основы оптики/М.Борн, Э.Вольф // 2-е изд., пер. с англ. под ред. Г.П.Мотулевич. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

47. *Якушенко Ю.Г.* Теория и расчет ОСП / Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 2011. – 444 с.

48. *Цисис Г.* Справочник по инфракрасной технике. Том 1. Физика ИК излучения / Г. Цисис, У. Волф // пер. с англ. – М.: Мир, 1995. – 606 с.

49. *Фесько Ю.А.* Разработка и исследование оптико-электронных методов определения трехмерной формы объектов. Автореф. на соискание ученой степени к.т.н. / Ю.А.Фесько // Новосибирск: СГГА, 2014. – 20 с.

50. *Иванов В.П.* Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов / В.П. Иванов, И.В. Курт, В.А. Овсянников и др. – Казань: Отечество, 2006. – 595 с.

51. А.с. №1667273 (СССР), МКИ H04N 5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов / В.М.Тымкул, Л.В. Тымкул, М.И. Ананич и др. // 1991, Бюл. №28.

52. Пат. №2141735С1 (РФ), МКИ H04N 5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов / В.М. Тымкул, О.В. Тымкул, Л.В. Тымкул и др. // 1999, Бюл. № 32.

53. Пат. №2469265С1 (РФ), МКИ G01B 11/24. Устройство для бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов / В.М.Тымкул, Ю.А.Фесько // 2012, Бюл. №34.

3 АПАРАТУРА КОНТРОЛЮ БОЙОВИХ МОДУЛІВ

Як показано в підрозділі 1.2.1, ймовірність перемоги однієї з протиборчих сторін залежить від щільності ефективного потоку пострілів за час функціонування зброї. Поняття «ефективний потік пострілів» потребує певного пояснення.

Уявімо ситуацію, коли зброя забезпечує необхідну щільність потоку пострілів, але усі постріли не влучають у ціль. Такий потік пострілів не можна назвати «ефективним». Тому «ефективним потоком» слід вважати такий потік, коли його вісь спрямована в площину цілі або в точку упередження за увесь час функціонування зброї. Які причини неефективності? Головна з них – кутова розбіжність осі каналу ствола зброї і лінії прицілювання телевізійного прицілу, а причиною такої розбіжності може бути неякісне збирання ППС в процесі виробництва, що веде до похибки лінії прицілювання при експлуатації, порушення умов зберігання НРК та експлуатація в умовах, що не відповідають технічним умовам на зразок.

Саме тому на різних етапах життєвого циклу бойового модуля НРК проводять різні типи випробувань, в процесі яких контролюють стабільність взаємної орієнтації осі каналу ствола зброї і лінії прицілювання телевізійного прицілу.

3.1 Елементна база для апаратури контролю лінії прицілювання бойових модулів

Пристрої для визначення положення лінії прицілювання прицільно-пошукових систем, що були розглянуті в розділі 1, не здатні в повній мірі забезпечити виконання усіх вимог до засобів контролю БМ наземних роботизованих комплексів у силу закладених в них фізичних принципів роботи. Основною причиною є те, що вони були створені для контролю прицілів для стрілецької зброї, що працюють у видимому спектрі. В склад БМ входять два приціли:

телевізійний, що працює в спектральному діапазоні (0,3 - 1,1) мкм, і тепловізійний, що працює в спектральному діапазоні (8 - 14) мкм. Візирна лінія оптичного прицілу віддалена від осі каналу ствола зброї на (30 - 50) мм, а лінії прицілювання прицілів БМ віддалені від зброї на (100 - 500) мм для різних типів НРК. Стрілець візуально сприймає зображення, сформоване оптикою прицілу, у реальному часі. Оператор НРК сприймає зображення на віддаленому моніторі із затримкою, пов'язаною із часом на зчитування інформації з цифрового приймача, опрацювання сигналів процесором і відображення на матричному формувачі зображення.

Тому апаратура контролю має враховувати необхідність реалізації більш високої дискретності відлікового пристрою, необхідність одночасного контролю прицільних систем, що працюють у видимій та інфрачервоній областях спектру, доцільність контролю одним пристроєм бойових модулів з різною базовою відстанню між прицілами та зброєю. Також необхідно враховувати специфіку контролю БМ в бойових умовах: обмежений простір, обмежену тривалість контролю, скритність.

Для відліково-вимірювальної системи, яка забезпечує необхідну розподільну здатність, доцільно розглядати систему на основі сучасних позиційно-чутливих цифрових фотоприймачів: ПЗЗ-матриць (приладів із зарядовим зв'язком) і КМОН-матриць (комплементарних систем метал-оксид-напівпровідник) та світлодіодів замість лазера. Сучасні ПЗЗ- і КМОН-матриці мають мінімальний розмір пікселю 2 мкм, що в поєднанні з довгофокусною дзеркальною оптикою (500 - 1000 мм) в автоколімаційному каналі може забезпечити кутову роздільну здатність, що складає одиниці кутових секунд. Наявність в структурі БМ телевізійних камер з відповідним інтерфейсом та комп'ютера надає спроможності автоматизувати процес вимірювання з метою подальшого аналізу й обробки отриманих результатів, а також зменшити залежність результатів вимірювання від кваліфікації контролера.

Як показано в розділі 1, апаратуру контролю лінії прицілювання бойових модулів доцільно будувати на базі оптико-електронного блоку з просторово рознесеними колімаційним і вимірювальним каналами та дзеркалом, що матеріалізує вісь каналу ствола зброї. Таким чином, надалі саме така схема буде розглядатись як основна з урахуванням сучасної елементної бази: світлодіодів і ПЗЗ- або КМОН-матриць.

Обидва типи матриць мають свої переваги і недоліки [1]. До переваг ПЗЗ-матриць відноситься низький рівень шумів, високий коефіцієнт заповнення пікселів, висока ефективність (відношення числа зареєстрованих фотонів до їх загальної кількості) та великий динамічний діапазон. Недоліки ПЗЗ-матриць наступні: складна система зчитування, низька швидкодія (до 30 кадрів/с), а також високе енергоспоживання.

До переваг КМОН-матриць можна віднести високу швидкодію (до 500 кадрів/с), низьке енергоспоживання, можливість реалізувати на одному кристалі додаткові схеми. Недоліки КМОН-матриць наступні: низький коефіцієнт заповнення пікселів, малий динамічний діапазон і високий рівень шумів.

Враховуючи, що цифровий приймач використовується для високоточного вимірювання, доцільно обирати ПЗЗ-матрицю. Критеріями вибору конкретної ПЗЗ-матриці мають бути наступні:

- квадратна форма пікселя для передавання на дисплей з квадратними пікселями зображення без лінійних спотворень;
- роздільна здатність не менша 800х600 пікселів;
- кадрова частота не менше 25 кадрів/с.

3.2 Апаратура для первинного юстування прицільно-пошукової системи бойового модуля

В процесі виготовлення і юстування БМ лінії прицілювання прицілів прив'язуються до його системи координат, яка визначається віссю каналу ствола зброї, якою оснащено БМ. Задля забезпечення

такої прив'язки в складальних цехах використовується спеціальна контрольно-юстувальна апаратура (КЮА, рис. 3.1) [2].

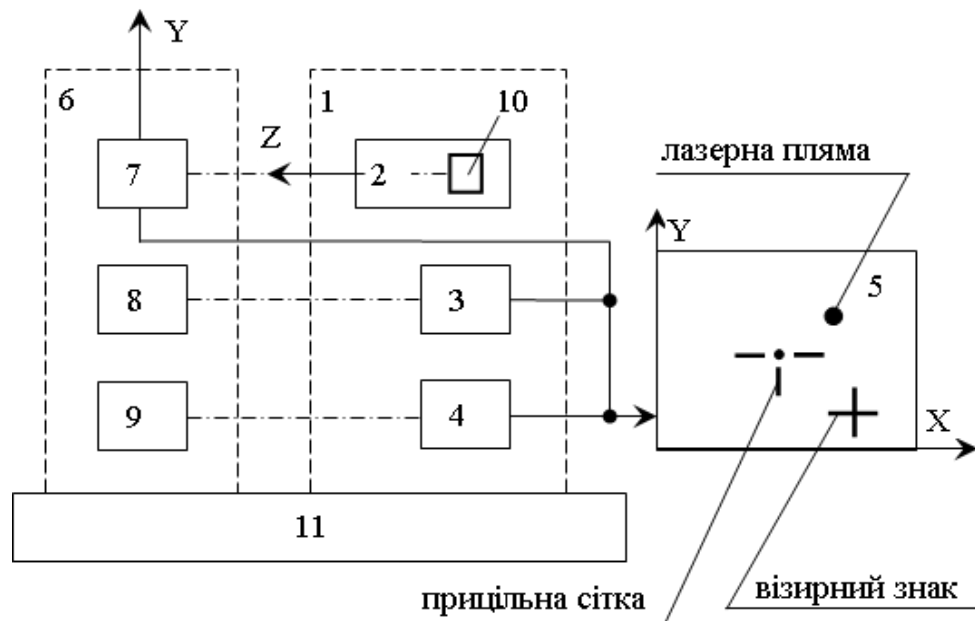


Рисунок 3.1 - Схема юстування прицілів БМ з використанням КЮА: 1 - бойовий модуль у складі: 2 – зброї, 3 – телевізійного прицілу, 4 - тепловізійного прицілу, 5 - віддаленого комп'ютера з дисплеєм оператора роботизованого комплексу; 6 - КЮ апаратура в складі: 7 – телевізійної камери, 8 – коліматора для телевізійного прицілу, 9 – інфрачервоного коліматора для тепловізійного прицілу, 10 - лазерного патрону; 11- робочий стіл

Матеріалізація осі Z каналу ствола зброї 2 здійснюється телевізійною камерою 7 і лазерним патроном 10. Для цього вихід телевізійної камери 7 з'єднується з комп'ютером 5, а лазерний патрон 10 встановлюється в канал ствола зброї 2. Еталонні напрями візування прицілів задаються звичайним 8 та інфрачервоним 9 нульовими коліматорами. Коліматор 9 будується на базі дзеркальної оптики. В якості джерела світла в ньому використовується лазер типу FNPL-3S-10800-DFB [3] ($\lambda_{max} = 10,8$ мкм). В якості координатно-чутливого приймача в телевізійній камері 7 використовується ПЗЗ-матриця з розмірністю 1600 x 1200 елементів, з розміром пікселю 2 x 2 мкм [4].

Суть юстування полягає в суміщенні зображень перехресть сіток прицілів, які формуються комп'ютером 5 на дисплеї оператора, і центрів зображень візирних знаків коліматорів 8 і 9, які

відображаються на екрані дисплею оператора. У процесі юстування бойового модуля 1 виконується наступна послідовність операцій [5].

1. КЮА 6 нівелюється, а БМ 1 монтується на робочому столі 11. Умикається телевізійна камера 7, і на екрані дисплею 5 формується координатна сітка ХУ, яка відображає систему координат XYZ КЮА 1.

2. У зброю 2 встановлюється і умикається лазерний патрон 10, і лазерна пляма відображається телекамерою 7 на дисплеї 5 (рис. 3.1). Шляхом обертання модуля 1 навколо осей Х та У лазерна пляма суміщається з центром системи координат ХУ дисплею 5 (обертання модуля 1 здійснюється приводами дистанційного управління бойовим модулем). У результаті цієї операції система координат БМ 1 суміщена із системою координат КЮА 6.

3. Умикається коліматор 8 і його візирний знак відображається телевізійним прицілом 3 на дисплеї 5 (рис. 3.1). Обертаннями корпусу прицілу 3 цей знак суміщається з лазерною плямою. У результаті цієї операції оптична вісь прицілу 3 стає колінеарною осі Z каналу зброї 2.

4. За допомогою комп'ютера 5 на дисплеї формується зображення прицільної сітки (рис. 3.1) і суміщається з візирним знаком. У результаті цієї операції система координат XYZ прицілу 3 прив'язана до системи координат XYZ БМ 1, тобто лінія прицілювання прицілу 3 колінеарна осі Z каналу ствола зброї 2.

5. Такі самі операції здійснюються з коліматором 9 і тепловізійним прицілом 4.

6. У результаті виконання всіх юстувальних операцій зображення лазерної плями, візирних знаків і прицільних сіток суміщені на екрані дисплею.

7. На корпусі БМ може бути встановлений 30" круглий пузирковий рівень, який використовуватиметься як базовий елемент при контролі систем БМ.

3.3 Юстування контрольно-юстувальної апаратури

Для того, щоб контрольно-юстувальна апаратура була спроможна прив'язувати лінії прицілювання до системи координат БМ, має бути розроблений алгоритм юстування самої КЮА. Алгоритм юстування базується на використанні трьох теодолітів 1, 2 і 3 (рис. 3.2) типу Т2А з автоколімаційним окуляром візирні осі $Z_{T,i}$ ($i = 1, 2, 3$) яких лежать у горизонтальних площинах і колінеарні між собою [6].

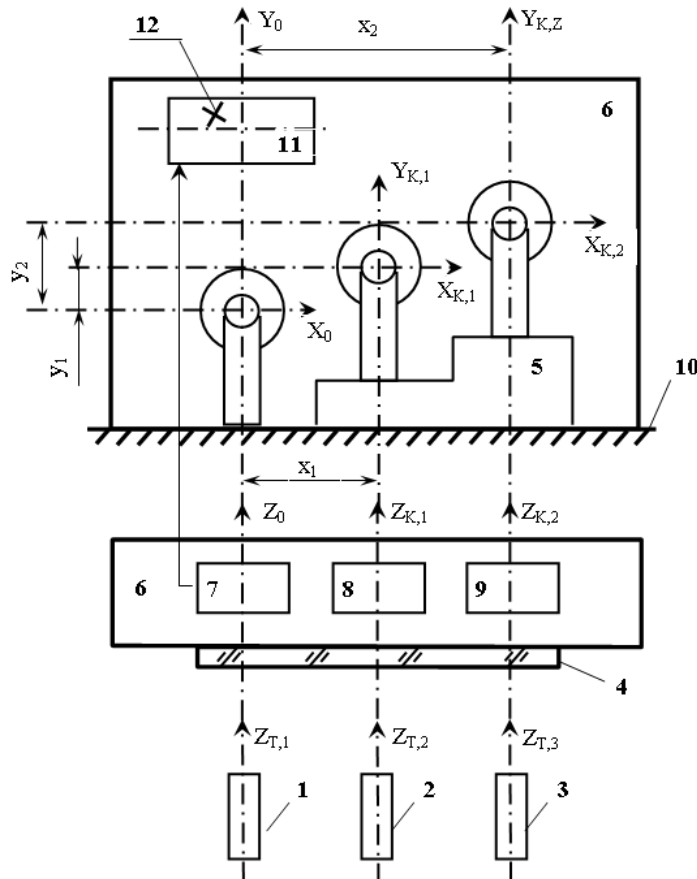


Рисунок 3.2 - Схема юстування КЮА (дві проекції): 1 - теодоліт для юстування телевізійної камери, 2 - теодоліт для юстування телевізійного прицілу, 3 - теодоліт для юстування тепловізійного прицілу, 4 - еталонне дзеркало (вид зверху), 5 - підставка для теодолітів (вид спереду), 6 - КЮА в складі телевізійної камери 7, лінзового коліматора 8, дзеркального коліматора 9, 10 - поверхня монтажного столика, 11 - дисплей телевізійної камери (вид спереду), 12 - зображення автоколімаційної сітки теодоліта 1 на екрані дисплею

Автоколімаційний окуляр має збільшення $25\times$, поле зору $1,5^\circ$, діаметр входної зіниці 35 мм, похибку вимірювання 2 кутові секунди.

Колінеарність візирних осей $Z_{T,i}$ забезпечується в автоколімаційному режимі із застосуванням еталонного дзеркала 4, апертура якого перекриває вхідні зіниці теодолітів, тобто похибка колінеарності δ_0 не перевищить 2 кутових секунд.

Для того, щоб візирні осі $Z_{T,i}$ теодолітів перетинали площину вхідної зіниці телевізійної камери 7 і площини вихідних зіниць коліматорів 8 і 9, використовується підставка 5. Якщо теодоліт 1 базується на поверхні монтажного столика 10, то висота підставки під теодоліт 2 становитиме $\sim y_1$, а висота підставки під теодоліт 3 становитиме $\sim y_2$. Відстань теодоліта 2 від теодоліта 1 становитиме $\sim x_1$, а відстань теодоліта 3 від теодоліта 1 становитиме $\sim x_2$.

Алгоритм юстування КЮА передбачає наступні операції, які виконуються послідовно [6].

1. Корпус КЮА встановлюється на поверхню 10 монтажного столика перед системою теодолітів так, щоб вхідна зіниця телевізійної камери 7 знаходилась в межах вхідної зіниці теодоліта 1. Після виконання цієї операції вихідні зіниці коліматорів 8 і 9 знаходитимуться в межах вхідних зіниць теодолітів 2 і 3.
2. Вмикають телевізійну камеру 7, а теодоліт 1 переводять в автоколімаційний режим. Після виконання цієї операції на дисплеї 11 спостерігається зображення осей X_0 і Y_0 телевізійної камери 6, а також зображення автоколімаційної сітки 12 теодоліту 1. В загальному випадку сітка 12 не суміщена з осями X_0 і Y_0 і має перекіс.
3. Розворотами корпусу телевізійної камери 7 навколо осей X_0 і Y_0 суміщають зображення сітки 12 з перехрестям осей X_0 і Y_0 , контролюючи процес на дисплеї 11. Прокачуванням зорової труби теодоліту 1 навколо горизонтальної осі перевіряють наявність перекосу сітки 12, і разі необхідності розвертають корпус телевізійної камери 7 навколо осі Z_0 . Після виконання цієї операції системи координат теодоліта 1 і телевізійної камери 7 будуть суміщені. Оскільки суміщення візуально контролюється на дисплеї 11, то згідно [7] неточність суміщення сіток становить 0,3 мрад або 0,075 мм для

відстані найкращого зору людини. Виходячи з цього і беручи до уваги принципи перетворення лінійних величин у кутові, похибка δ_1 суміщення визначається формулою:

$$\delta_1 = 0,075 / f' \Gamma_{el},$$

де $f' \geq 300$ мм - фокусна відстань довгофокусного об'єктиву телевізійної камери 7, а $\Gamma_{el} \geq 20$ - електронне збільшення системи, яке визначається співвідношенням діагоналей дисплея 11 і координатно-чутливого фотоприймача зображення телевізійної камери 7.

Якщо врахувати технічні характеристики сучасних телевізійних систем, які використовуються у військовій техніці, то можна зробити висновок, що похибка δ_1 не перевищуватиме 3 кутові секунди.

4. Вмикають світлодіод в коліматорі 8 і візуально спостерігають в теодоліті 2 збільшене зображення візирного знаку коліматора 8. В загальному випадку візирний знак не суміщений з сіткою теодоліта 2 і має перекіс.

Розворотами корпусу коліматора 8 навколо осей $X_{k,2}$ і $Y_{k,2}$ суміщають зображення візирного знака з перехрестям сітки теодоліта 2. Прокачуванням зорової труби теодоліту 2 навколо горизонтальної осі перевіряють наявність перекосу візирного знаку, і в разі необхідності розвертають корпус коліматора 8 навколо осі $Z_{k,2}$. Після виконання цієї операції системи координат теодоліта 2 і коліматора 8 будуть суміщені. Згідно дослідженням Штампфера [8] індивідуальна середньоквадратична похибка оператора δ_{on} , який користується оптичним приладом із збільшенням Γ для суміщення його сітки з ціллю (в даному випадку перехрестям візирного знака), визначається формулою:

$$\delta_{on} = (15'' - 50'')/\Gamma.$$

З врахуванням технічних характеристик теодоліта Т2А маємо $\delta_{on} \leq 2$ кутових секунд. Таким чином сумарна похибка δ_2 суміщення систем координат коліматора 8 і телевізійної камери 7 визначиться формулою:

$$\delta_2 = (\delta_0^2 + \delta_1^2 + \delta_{on}^2)^{1/2}$$

и становитиме до 4 кутових секунд.

5. Вмикають світлодіод в дзеркальному коліматорі 9 і візуально спостерігають в теодоліті 3 збільшене зображення візирного знаку коліматора 9. Повторюють операцію 4 стосовно суміщення систем координат коліматора 9 і телевізійної камери 7. Похибка суміщення δ_3 , як і в попередньому випадку, не перевищить 4 кутових секунд.

6. Вимикають світлодіод в дзеркальному коліматорі 9 і переводять його в режим роботи з інфрачервоним лазером.

КЮА юстована і придатна до роботи.

3.4 Апаратура контролю стабільності лінії прицілювання в процесі стендових випробувань

Стендові випробування БМ НРК проводяться на спеціальному ударному стенді типу СМ-1М із застосуванням контрольно-вимірювальної апаратури, яка задовольняє розробленим в підрозділі 1.2.2 вимогам. Як показано вище, ця апаратура має будуватись на базі оптико-електронного блоку з просторово рознесеними колімаційним і автоколімаційним каналами та дзеркала [9, 10].

3.4.1 Фіксація дзеркала на зброї

Як показав аналіз, методи фіксації дзеркала, що існують [11], забезпечують матеріалізацію каналу ствола зброї з похибкою 3".

З цієї точки зору має перевагу метод фіксації дзеркала на зрізі ствола зброї за допомогою магнітного корпусу [12]. При такому методі фіксації виключається похибка неоднозначності положення нормалі до відбиваючої площини дзеркала завдяки однозначності базування його корпусу на зброї [13].

3.4.2 Джерело підсвічування сітки колімаційного каналу

В склад БМ входять два приціли: телевізійний, що працює у видимому спектральному діапазоні (0,3 - 1,1) мкм, і тепловізійний, що

працює в інфрачервоному спектральному діапазоні (8 - 14) мкм. Виходячи з цього, зображення контрольної сітки, сформоване колімаційним каналом, повинне формуватись в цих спектральних діапазонах. Можливі три варіанти побудови такого джерела (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Варіанти побудови джерела підсвічування сітки колімаційного каналу

Спектральний діапазон	Принцип формування зображення сітки		
	Варіант		
	1	2	3
Видимий	Відбиття світла	Пропускання світла	Пропускання світла
Інфрачервоний	Випромінювання теплової енергії	Випромінювання теплової енергії	Пропускання теплової енергії
Схема побудови джерела			

У варіанті 1 на непрозору підкладку 1, що охолоджується, наноситься покриття 26Г [14] у вигляді малюнка контрольної сітки 3 колімаційного каналу та інварові електроди 4. Світлодіод 2 призначений для підсвічування сітки 3. При контролі телевізійного прицілу вмикається світлодіод 2 і світло відбивається на малюнку сітки 3 (коефіцієнт відбиття покриття 26Г становить 18%). При контролі тепловізійного прицілу на електроди 4 подається напруга для нагріву сітки 3. Можлива інша реалізація цього варіанту: зображення контрольної сітки формується ніхромовою ниткою 1. При

контролі телевізійного прицілу вмикається світлодіод 2 і світло відбивається на ніхромі (коефіцієнт відбиття ніхрому становить 80%), формуючи зображення сітки. При контролі тепловізійного прицілу на ніхромову нитку подається напруга для нагріву сітки 1.

У варіанті 2 на прозору підкладку 1, що охолоджується, фотографічним шляхом наноситься непрозоре покриття 2 (вільною для світла залишається область у вигляді малюнка контрольної сітки 3. На цю область наноситься покриття 26Г та інварові електроди 4. Світлодіод 5 призначений для підсвічування сітки 3. При контролі телевізійного прицілу вмикається світлодіод 5 і світло проходить крізь малюнок сітки 3 (коефіцієнт пропускання покриття 26Г завтовшки 5 мкм становить 78%). При контролі тепловізійного прицілу на електроди 4 подається напруга для нагріву сітки 3.

У варіанті 3 в непрозорій діафрагмі 1, що охолоджується, виконується отвір у вигляді малюнка контрольної сітки. Позаду діафрагми 1 розміщується вузол 2 комутації джерел енергії: світлодіода 3 та хімічної грілки 4. При контролі телевізійного прицілу світлодіод 3 займає положення напроти сітки і світло проходить крізь малюнок сітки 3. При контролі тепловізійного прицілу хімічна грілка 4 займає положення напроти сітки і тепла енергія формує малюнок сітки.

3.4.3 Оптичні схеми колімаційного каналу

Оскільки колімаційний канал призначений для контролю прицілів, що працюють у видимій та інфрачервоній областях спектру, то це передбачає використання дзеркальної оптики для формування зображення контрольної сітки.

На рис. 3.3 зображена типова оптична схема дзеркального колімаційного каналу. Як видно з цієї схеми, при великій відстані *Б* між вхідними зіницями телевізійного і тепловізійного прицілів (яка може використовуватись як база зовнішньобазового далекоміру ППС)

дзеркальний об'єктив має велику лінійну апертуру. По-друге, такий колімаційний канал неможливо використовувати задля контролю різних типів НРК з різною базою між входними зіницями прицілів і віссю каналу ствола зброї. Все це унеможливило використання такого колімаційного каналу для контролю ППС НРК.

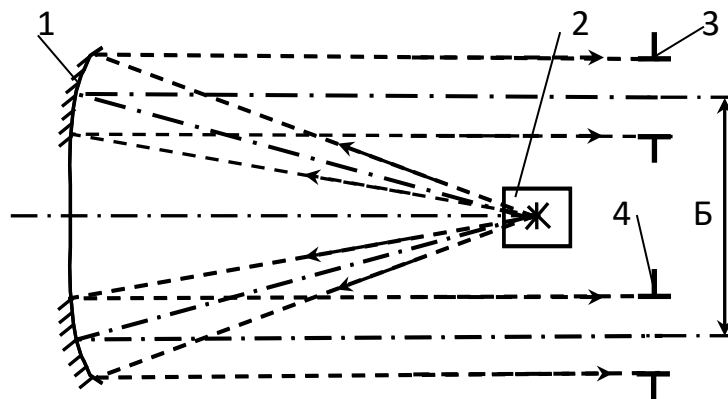


Рисунок 3.3 - Дзеркальний колімаційний канал: 1 – параболічний дзеркальний об'єктив з отвором, 2 – вузол контрольної сітки, 3 – входна зіниця телевізійного прицілу, 4 - входна зіниця тепловізійного прицілу

Звідси витікає необхідність створення дзеркальних схем задля паралельного переносу напрямку випромінювання енергії. З теорії оптичних систем добре відома властивість дзеркального ромба $B-0^\circ$ і ромб-призми $BC-0^\circ$: при будь-якому спрямуванні променя, що входить в ромб, промінь, що виходить з ромба, залишається колінеарним променю, що входить, а будь-який поворот дзеркального ромба не впливає на колінеарність [14]. Тому на основі поворотного дзеркального ромба можна створювати оптичні вузли для переносу напрямку випромінювання енергії.

На рис. 3.4 зображені три схеми вузлів, побудованих на базі дзеркального ромбу.

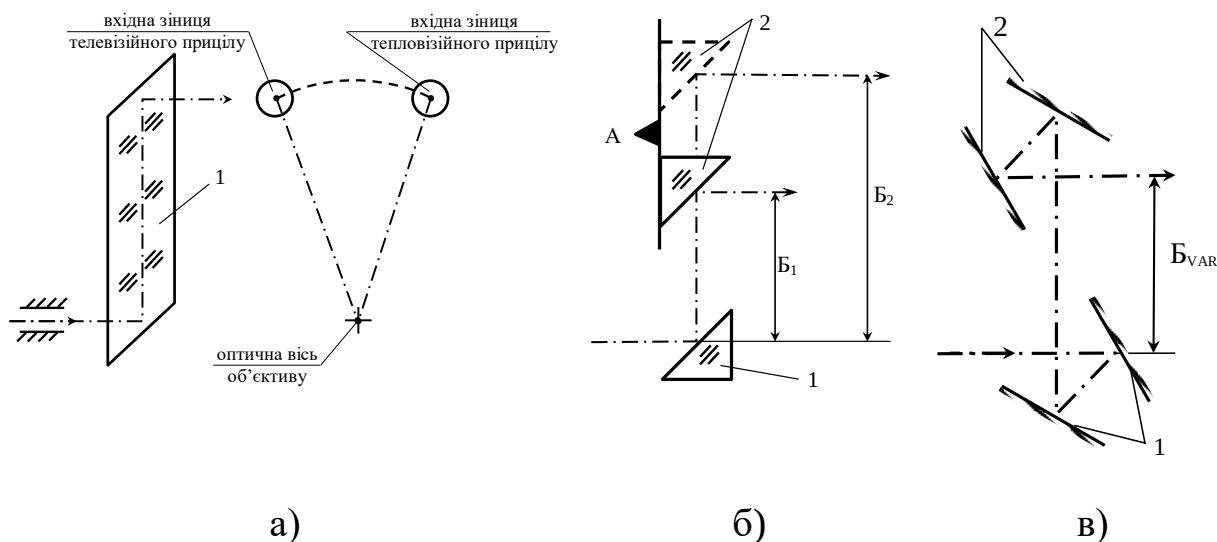


Рисунок 3.4 – Схеми вузлів переносу напрямку випромінювання енергії: а) – на базі призми БС-0° (ромб, дві проекції); б) – на базі призм АР-90°; в) – на базі призм БП-90° (пентапризм, пояснення в тексті)

В разі компоновки ППС в двох корпусах при $R=\text{const}$ (рис. 2.14) доцільно використовувати вузол на базі схеми 3.4, а). Сама призма 1 виготовляється з сульфїду або селенїду цинку, прозорих в області спектру (0,4 - 14) мкм. При обертанні навколо оптичної осї об'єктиву призма 1 послїдовно переносить зображення контрольної сїтки у вхїдну зїницю телевізїйного або тепловїзїйного прицїлу.

Вузол на базї схеми на рис. 3.4, б) будується на базї двох призм АР-90°, гїпотенузні дзеркальні гранї яких утворюють ромбїчну схему. Призма 1 закрїплена нерухомо на корпусї вузла. А призма 2 перемїщується вздовж базової площини А, змїнюючи таким чином вїдстань B_i мїж вхїдним і вихїдним променем.

Вузол на базї схеми на рис. 3.4, в) будується на базї двох пентадзеркал. Пента-дзеркало 1 закрїплене нерухомо на корпусї вузла, а пента-дзеркало 2 перемїщується вздовж базової площини, що лежить в площинї рисунку, змїнюючи таким чином вїдстань B_{var} мїж вхїдним і вихїдним променями.

Можливі двї принциповї оптичні схеми колїмацїйного дзеркального каналу з врахуванням синтезованих вузлів переносу напрямку випромїнювання енергїї (рис. 3.5).

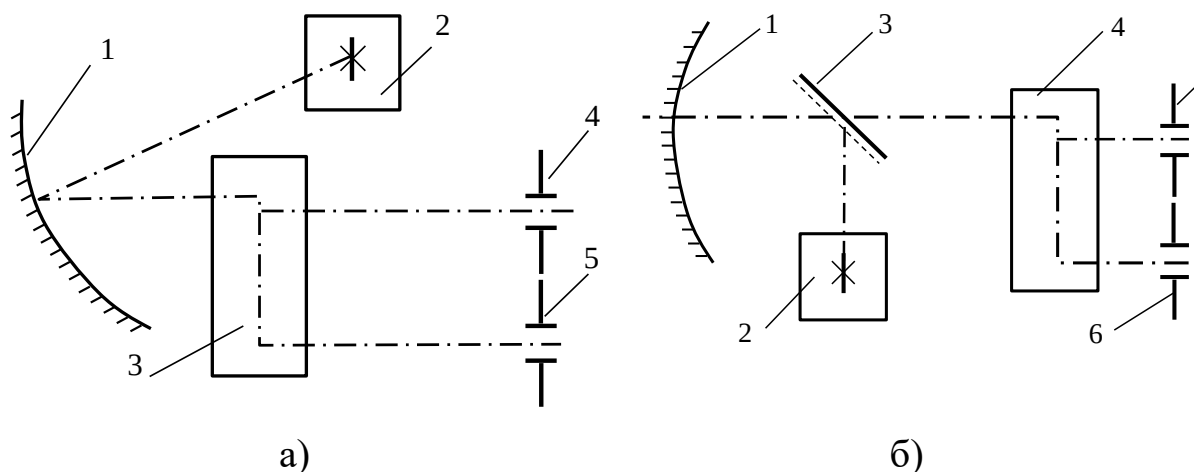


Рисунок 3.5 - Оптичні схеми колімаційного дзеркального каналу (позначення в тексті)

Схема, зображена на рис. 3.5, а), будується на базі поза-осьового дзеркального об'єктиву 1, джерела підсвічування контрольної сітки 2 і вузла переносу напрямку випромінювання 3, який скеровує випромінювання у вхідні зіниці телевізійного 4 і тепловізійного 5 прицілів.

Схема, зображена на рис. 3.5, б), будується на базі осьового дзеркального об'єктиву 1, джерела підсвічування контрольної сітки 2, яка суміщається з фокусом об'єктиву 1 за допомогою напівпрозорої пластини 3, та вузла переносу напрямку випромінювання 4, який скеровує випромінювання у вхідні зіниці телевізійного 5 і тепловізійного 6 прицілів. Пластина 3 виготовлена з сульфїду або селенїду цинку, прозорих в області спектру (0,4 – 14) мкм.

3.4.4 Апаратура і алгоритм контролю стабільності лінії прицілювання

На рис. 3.6 зображена структурна схема блоку контролю стабільності лінії прицілювання в процесі стендових випробувань, створена на базі елементів, розглянутих в попередніх розділах.

В склад колімаційно-вимірjuвального блоку 1 входять: автоколїмаційний канал 2, колїмаційний канал 3, розглянутий в

підрозділі 3.4.3, вузол 4 дзеркала для матеріалізації осі каналу ствола зброї, розглянутий в підрозділі 3.4.1, і вузол 5 для переносу напрямку випромінювання енергії, розглянутий в підрозділі 3.4.3. До складу колімаційного каналу 3 входять дзеркальний об'єктив 6 і джерело підсвічування контрольної сітки 7, розглянуті в підрозділі 3.4.2.

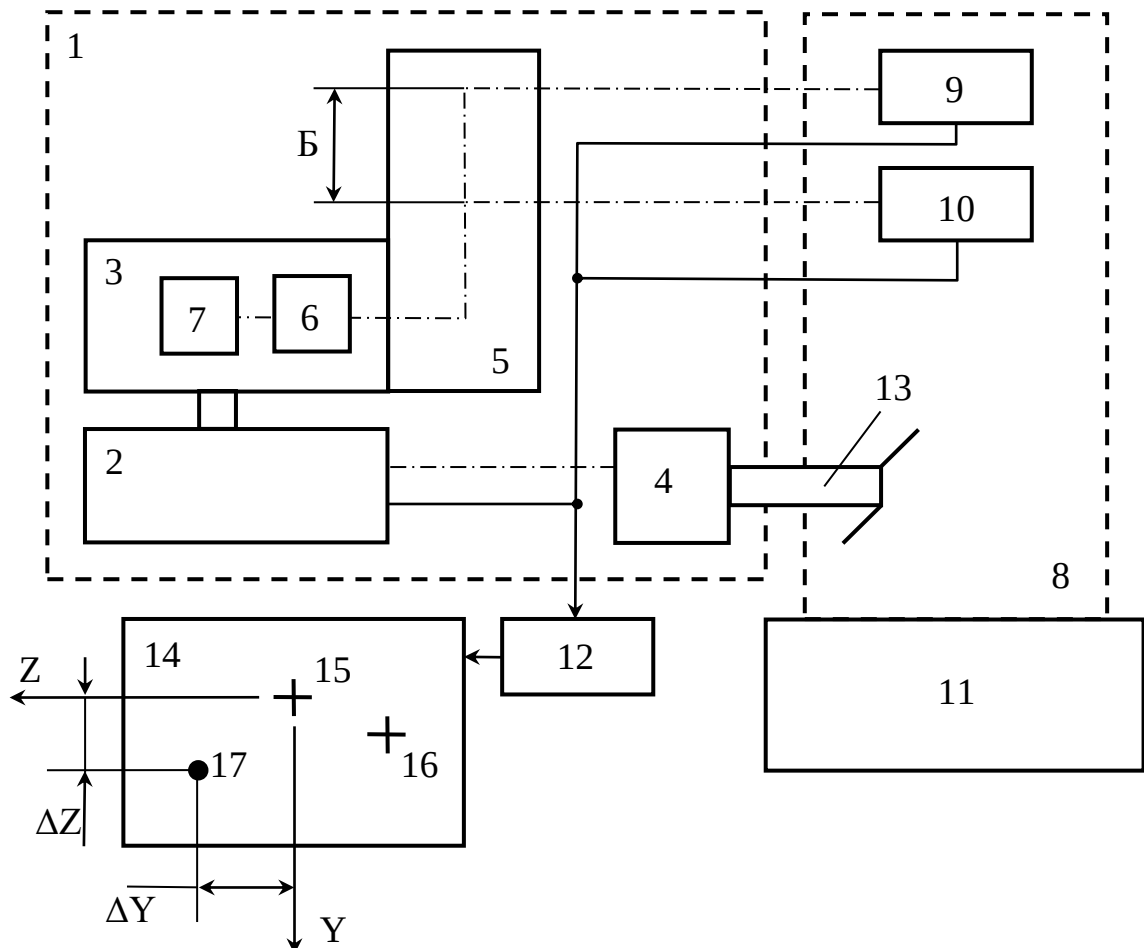


Рисунок 3.6 - Структурна схема колімаційно-вимірювального блоку: 1 - колімаційно-вимірювальний блок, 8 - БМ НРК (інші позначення в тексті)

Алгоритм контролю стабільності лінії прицілювання передбачає наступну послідовність операцій.

На першому етапі контролер закріплює юстований бойовий модуль 8 НРК на ударному стенді 11 за допомогою опор. Електричні виходи прицілів 9 і 10 та автоколімаційного каналу 2 оператор з'єднує з комп'ютером 12. Суміщає магнітний корпус дзеркала 4 зі зрізом

ствола зброї 13. При цьому дзеркало 4 займає однозначне положення при багатократній перестановці його на зброї: його нормаль завжди колінеарна осі каналу ствола зброї 13. Комп'ютер 12 формує на екрані монітору 14 зображення контрольної мітки 15, яка визначає систему координат YZ і відображає нуль автоколімаційного каналу (рис. 3.6). Далі контролер встановлює контрольно-вимірювальний блок 1 поряд з бойовим модулем 8 так, щоб вихідна зіниця об'єктиву його автоколімаційного каналу 2 знаходилась напроти дзеркала 4.

На другому етапі контролер включає джерело, яке підсвічує контрольну мітку автоколімаційного каналу 2. Пучки променів від контрольної мітки заповнюють апертуру об'єктива, виходять колімованими і відбиваються дзеркалом 4 у зворотному напрямку (режим автоколімації). Об'єктив створює зображення контрольної мітки на цифровому фотоприймачі автоколімаційного каналу. Після опрацювання комп'ютером 12 ця контрольна мітка 16 відображається на моніторі 14 (рис. 3.6). Якщо нормаль до дзеркала 4 (тобто вісь каналу ствола зброї 4) не співпадає за напрямком з оптичною віссю автоколімаційного каналу 2, то на екрані монітору 14 контрольна точка 16 не співпадатиме з нулем 15 автоколімаційного каналу 2. Контролер розвертає колімаційно-вимірювальний блок 1 до моменту співпадиння зображення контрольної мітки 16 на моніторі з початком системи координат YZ. В результаті цих операцій вісь каналу ствола зброї 13 співпадає за напрямком з оптичною віссю автоколімаційного каналу і оптичною віссю колімаційного каналу 3, сформованою контрольною сіткою 7 і об'єктивом 6.

На третьому етапі контролер включає телевізійний приціл 9 і джерело випромінювання колімаційного каналу 3. Промені, що виходять з об'єктиву 6, проходять вузол 5 для переносу напрямку випромінювання (наприклад, ромб-призму) і виходять з неї колінеарними оптичній осі колімаційного каналу (осі каналу ствола зброї 13). При цьому при будь-якому довільному положенні ромб-призми зберігається колінеарність осі каналу ствола зброї 13 та

оптичної осі колімаційного каналу 3 (властивість призми БС-0°). Контролер орієнтує вихідну зіницю ромб-призми напроти вхідної зіниці тепловізійного прицілу 9. Якщо лінія прицілювання прицілу 9 не колінеарна осі каналу ствола зброї 13, то зображення контрольної сітки 7 відображається на екрані монітору 14 у вигляді зміщеної точки 17 в системі координат YZ (рис. 3.6). Регулюючи електронну схему прицілу 9, контролер усуває розбіжності ΔY , ΔZ між зображенням точки 17 і початком системи координат YZ, контролюючи процес на моніторі 14. Після цього приціл 9 вважається пристріляним до зброї 13.

На четвертому етапі дзеркало 4 знімається зі зброї і приводиться в дію ударний стенд 11. Повторюються операції другого і третього етапів при встановленому дзеркалі 4. Якщо після цього на екрані монітору 14 розбіжність між зображеннями контрольної сітки 17 і початком системи координат YZ не перевищує 0,5 т.д., то це свідчить про якісне збирання тепловізійного прицілу 9.

Для виключення похибки контролера при визначенні розбіжностей може застосовуватись автоматичний метод вимірювання. Зокрема, при формуванні зображення контрольної сітки 7 у вигляді квадрату може застосовуватись методика розрахунку її центру, розглянута у підрозділі 3.6, формули (3.7), (3.8).

На п'ятому етапі контролер розвертає вузол 5 так, щоб вихідна зіниця ромб-призми знаходилась напроти вхідної зіниці тепловізійного прицілу 10. Далі контролер повторює операції етапів два, три і чотири стосовно тепловізійного прицілу 10.

Таким чином забезпечується контроль якості збирання бойового модуля НРК.

При такому технологічному процесі можна сформулювати перелік окремих помилок, що викликають похибку визначення положення лінії прицілювання: похибка $\delta_{дз}$ визначення координат центру зображення точкового джерела в площині фотоприймального

пристрою, обумовлена його дискретністю; похибка $\delta_{\text{вдл}}$ зняття відліку по сітці колімаційного каналу.

При використанні в якості фотоприймального пристрою ($\frac{1}{4}$)" ПЗЗ-матриці з розміром пікселя 2 мкм і об'єктиву з фокусом 500 мм в автоколімаційному каналі 2: $\delta_{\text{дз}} = 0,5''$ в режимі автоколімації. При полі зору колімаційного каналу $1,8^\circ$ і ціні поділки сітки 30": $\delta_{\text{вдл}}=7,5''$.

В цьому разі сумарна похибка $\delta_{\text{пк}}$ вимірювання із застосуванням синтезованого пристрою контролю визначиться наступною формулою $\delta_{\text{пк}} = (\sum \delta_i^2)^{1/2}$ і становить 7,5".

Якщо в якості критерію оптимальності структури пристрою контролю стабільності лінії прицілювання прийняти рейтинг R , за яким порівнювались відомі пристрої контролю в підрозділі 1.3, то пристрій нової структури має найвищий узагальнений показник якості (рейтинг, табл. 3.2), що свідчить про оптимальність його структури.

Таблиця 3.2

Значення характеристик апаратури та її рейтинг

Характеристика	Точність вимірювання, сек	Діапазон вимірювання, град	Контроль у видимій та ІЧ областях спектру	Безпека експлуатації	Універсальність	Рейтинг, R
ЛПХП	78/0,096	1,4/0,19	ні/0	ні/0	так/1	0,279
ТХП	73/0,103	7,3/1	ні/0	так/1	так/1	0,552
СК	72/0,104	1/0,14	так/1	так/1	ні/0	0,372
КВБ-Л	7,7/0,97	1,8/0,25	так/1	ні/0	ні/0	0,475
КВБ-Д	8,1/0,93	1,8/0,25	так/1	так/1	ні/0	0,653
КВБ нової структури	7,51/1	1,8/0,25	так/1	так/1	так/1	0,895

3.5 Застосування методу сегментації зображень при контролі стабільності лінії прицілювання в процесі стендових випробувань

При формування зображення контрольної мітки 15 у вигляді перехрестя, що відображає систему координат YZ ПЗЗ-матриці

телевізійного прицілу, може застосовується метод сегментації зображень [5, 11], представлений на рис. 3.7. При цьому перевіряється стабільність кутового положення лінії прицілювання при динамічному навантаженні на приціл.

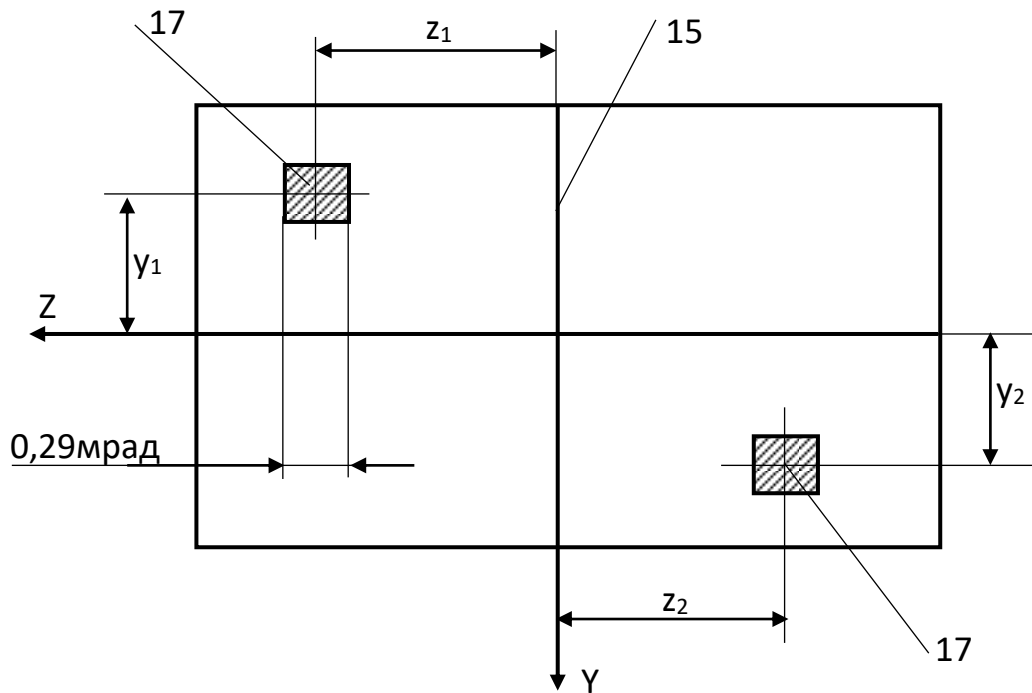


Рисунок 3.7 - Схема формування зображень на цифровому приймачі прицілів

На першому етапі контролер закріплює юстований бойовий модуль 8 НРК з телевізійним 9 і тепловізійним 10 прицілами на ударному стенді 11 за допомогою опор. Електричні виходи прицілів 9 і 10 з'єднує з комп'ютером 12. Контролер орієнтує вихідну зіницю ромб-призми блоку 5 напроти входної зіниці телевізійного прицілу 9 і включає колімаційний канал 3 та приціл 9. Спостерігаючи на екрані дисплея 14 зображення контрольної мітки 15, сформованої комп'ютером 12 як початок системи координат YZ ПЗЗ-матриці, та зображення контрольної сітки 17, сформованої колімаційним блоком 3 і прицілом 9 у вигляді квадрата з кутовим розміром сторони 0,29

мрад, контролер розворотами блоку 3 максимально наближує зображення сітки 17 до перехрестя мітки 15.

Комп'ютер 12 автоматично розраховує координати центра квадрату 17 (y_1, z_1) в системі координат YZ цифрового приймача телевізійного прицілу 9 методом обчислення енергетичного центру зображення квадрату з субпіксельною точністю з похибкою одного пікселя [5, 11]:

$$y_1 = a(m_1 \pm 1), \quad z_1 = a(n_1 \pm 1),$$

де m_1 і n_1 – кількість пікселів між перехрестям мітки 15 і центром квадрату 17, а a – розмір пікселя цифрового приймача телевізійного прицілу 9.

На другому етапі приводиться в дію ударний стенд 11. При неякісному збиранні прицілу 9 зображення квадрату 17 зміщується і комп'ютер 12 автоматично розраховує координати його центру (y_2, z_2) в системі координат YZ цифрового приймача телевізійного прицілу 9 з похибкою одного пікселя:

$$y_2 = a(m_2 \pm 1), \quad z_2 = a(n_2 \pm 1),$$

де m_2 і n_2 – кількість пікселів між перехрестям мітки 15 і зміщеним центром квадрату 17.

Величина зміщення центру квадрату 17 в лінійній мірі визначається формулами

$$y = a(m_1 + m_2 \pm 2), \quad z = a(n_1 + n_2 \pm 2).$$

Величина сумарного зміщення по двом координатам s розраховується за формулою

$$s = a[(m_1 + m_2 \pm 2)^2 + (n_1 + n_2 \pm 2)^2]^{1/2}.$$

Величина зміщення s у кутовій мірі визначиться формулою:

$$\delta_s = a[(m_1 + m_2 \pm 2)^2 + (n_1 + n_2 \pm 2)^2]^{1/2},$$

де f_9 – фокусна відстань об'єктиву телевізійного прицілу. При використанні високоякісного об'єктиву і паспортизації його фокусної відстані похибкою впливу допуску на фокус можна нехтувати.

Наприклад, при $a = 2$ мкм і $f_9 = 80,2$ мм похибка контролю стабільності лінії прицілювання $\Delta\delta_s = 2,82a/f_9 = 14,5''$.

3.6 Апаратура контролю стабільності лінії прицілювання в процесі перевірконої стрільби

Контроль положення лінії прицілювання бойового модуля наземного роботизованого комплексу в місцях його експлуатації із застосуванням «лазерного патрону», лазерного приладу «холодного» пристрілювання, трубки «холодного» пристрілювання, ствольного коліматору і оптико-електронного комплексу [9,10] передбачає наявність спеціальної апаратури і потребує певних затрат часу та кваліфікації стрільця-випробувача, який здійснює контроль. З цієї точки зору безумовну перевагу має перевірна стрільба, яка успішно застосовується при перевірці лінії візування оптичних прицілів стрілецької зброї [11, 15]. Сутність такої перевірки полягає у виконанні стрільцем-випробувачем серії одиночних пострілів у віддалену стандартну мішень з наступним визначенням положення середньої точки влучення (СТВ) і порівнянні її з розрахунковим положенням проекції осі каналу ствола зброї на віддаленій мішені (рис. 3.8) [15].

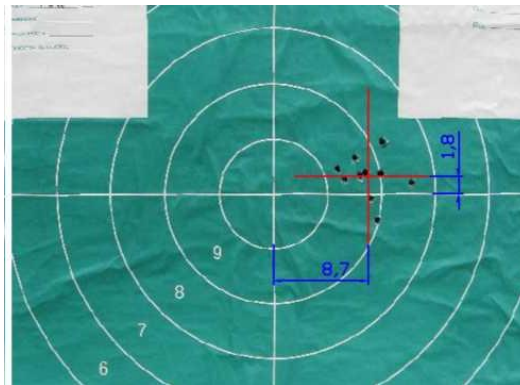


Рисунок 3.8 - Мішень після виконання перевірконої стрільби, розміри в см

Але в склад БМ НРК входить телевізійний та тепловізійний приціли, які працюють в різних спектральних діапазонах: (0,4 - 1,1) мкм та (8-14) мкм відповідно. По-друге, вісь каналу ствола зброї віддалена від оптичних осей телевізійного і тепловізійного прицілів на (100 - 500) мм у різних типів НРК (рис. 3.9). І цю відстань необхідно враховувати при контролі.



Рисунок 3.9 - Багатоцільовий НРК «Фантом» (Україна)

3.6.1 Алгоритми перевірконої стрільби зі зброї БМ НРК

Розглянемо алгоритми контролю ліній прицілювання бойового модуля наземного роботизованого комплексу в місцях його експлуатації методом перевірконої стрільби.

Алгоритм 1

На дистанції s передньої границі чіткого бачення прицілів встановлюється вертикальний щит за допомогою виска. Спостерігаючи висок в телевізійний приціл, оператор-випробувач усуває можливий завал НРК. Після чого нівелюється ствол зброї за допомогою рівня, який інсталюється на ствол зброї за допомогою спеціального корпусу з V- подібною направляючою із протівідкидним елементом у вигляді циліндричного стрижня.

Виконується серія пострілів у щит, і СТВ. Ця точка приймається за початок системи координат YZ БМ (рис. 3.10).

На щит наносяться два реперні знаки у вигляді точок, координати яких $A(u_{ТВ}; z_{ТВ})$ і $B(u_{ТПВ}; z_{ТПВ})$ відповідають віддаленню оптичних осей прицілів від осі каналу ствола зброї, та окружностей, діаметри $\varnothing$ яких відповідають припустимому відхиленню лінії прицілювання зброї НРК, яке становить $0,5$ т.д. ($108''$) [15]. Для перевірконої стрільби $\varnothing = 0,0005$ с. Для дистанції 25 м діаметр окружності становить $12,5$ мм.

Позаду реперного знаку В встановлюється хімічна грілка, яка формує зображення цього знаку в спектральному діапазоні (8 – 14) мкм.

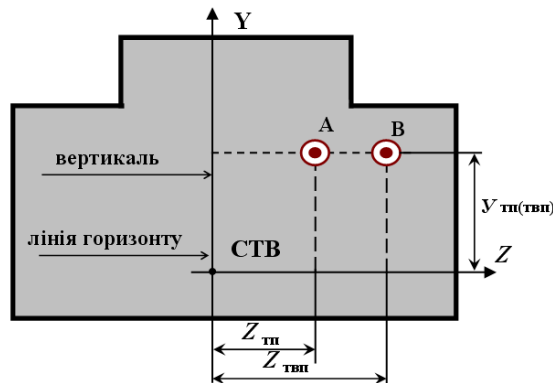


Рисунок 3.10 - Розмітка щита

Включається телевізійний приціл і оператор-випробувач спостерігає на екрані монітору зображення реперних знаків і прицільної марки. В разі виходу зображення прицільної марки за межі окружності її положення коригується електронною схемою прицілу.

Аналогічно контролюється положення лінії прицілювання тепловізійного прицілу.

До основних джерел похибок, які впливають на похибку контролю при перевірочній стрільбі, можна віднести:

- похибку $\delta_{БАЗ}$ внаслідок неоднозначності інсталяції рівня на зброї;
- похибку $\delta_{НІВ}$ нівелювання зброї, обумовлена точністю рівня;
- похибку $\delta_{СТВ}$ визначення середньої точки влучення,
- похибку $\delta_{РОЗ}$ розмітки щита (позначення точок А і В на щиті в системі координат YZ),
- похибку $\delta_{ВІЗ}$ візування при оцінці положення зображення прицільної марки відносно зображення реперного знаку на екрані монітору БМ.

Похибка неоднозначності інсталяції рівня на зброї аналогічна похибці базування дзеркала в колімаційно-вимірювальному блоці з просторово рознесеними колімаційним і вимірювальним каналами та дзеркалом [16] і за даними досліджень [11] $\delta_{БАЗ} = 3''$.

Похибка $\delta_{НІВ}$ нівелювання зброї визначається типом рівня і при використанні високоточного циліндричного рівня ГОСТ 2.386-73 не перевищує 10".

СТВ визначається візуально, виходячи з калібрів використовуваної зброї, кількості пострілів у серії й використовуваних засобів визначення СТВ. Згідно дослідження [11] для серії чотирьох пострілів і використання металевої лінійки з ціною поділки 1 мм $\delta_{СТВ} = 30''$.

Якщо при розмітці щита, віддаленого на 25 м, використовується висок і металева лінійка з ціною поділу 1 мм, то похибка $\delta_{РОЗ}$ розмітки екрану в кутовій мірі визначається формулою:

$$\delta_{РОЗ} = 0,001 / 2 s = 4''.$$

Взаємне положення зображень прицільної марки і реперного знаку оцінюється неозброєним оком на екрані монітору БМ. Згідно [7] неточність оцінки неозброєним оком взаємного положення центру кола малого діаметру і перехрестя становить 30". Виходячи з цього похибка візування $\delta_{ВІЗ}$, обумовлена розбіжністю зображень прицільної марки і реперного знаку на моніторі БМ, приймається рівною $\delta_{ВІЗ} = 30''$.

Приймаючи до уваги, що окремі похибки δ_i ($i = 5$) незалежні друг від друга, то сумарна похибка $\delta_{ПС}$ контролю при перевіірочній стрільби визначиться наступною формулою $\delta_{ПС} = (\sum \delta_i^2)^{1/2}$ і становить 43,9".

Відповідно до рекомендацій Міждержавної ради із стандартизації, метрології і сертифікації [18] межа похибки контролю, що допускається та не призводить до помітних втрат або інших несприятливих наслідків, має становити (0,2 - 0,3) межі симетричного допуску на важливий параметр, що контролюється. Враховуючи наведену вище умову і беручи до уваги, що характеристики щодо положення лінії прицілювання належать до категорії важливих, цю умову можна перенести на прицільну техніку таким чином: похибка методики і засобів контролю, що допускається, не повинна перевищувати (0,2 - 0,3) від максимально припустимого відхилення положення лінії прицілювання контрольованого прицілу. Тобто

максимальне значення припустимої похибки методики перевірконої стрільби БМ НРК не повинне перевищувати $(0,2 - 0,3) \cdot 108'' = 27 \pm 5''$.

Таким чином, точність контролю лінії прицілювання при перевірочній стрільбі за цим алгоритмом не відповідає вимогам до точності методів контролю положення лінії прицілювання БМ.

Алгоритм 2

Аналізуючи складові похибок, видно, що на точність контроль суттєво впливає похибка візування, пов'язана із особливостями зорової системи людини. Розглянемо можливість автоматизації цього процесу, враховуючи, що і телевізійний, і тепловізійний прицілі будуються на базі процесору та цифрових приймачів зображення: ПЗЗ- або КМОН-матриці та мікроболометричної матриці відповідно.

Автоматизація процесу визначення положення прицільної марки відносно реперного знаку можлива в разі, якщо реперний знак на щиті буде формувати визначену систему координат, ця система координат буде відображатись на цифровому приймачі і в ній можна буде визначати положення прицільної марки. Далі можливі два варіанти розвитку алгоритму. В першому варіанті можна перерахувати визначене положення прицільної марки на цифровому приймачі у систему координат на щиті і порівняти з проектними значеннями координат лінії прицілювання. В іншому варіанті можна перерахувати положення СТВ на щиті у систему координат на цифровому приймачі і порівняти з проектними значеннями СТВ.

На рис. 3.11 зображено щит, на якому попередньо сформовані 4 реперні знаки у вигляді квадратів [15]. Реперні знаки B_1 і B_2 сформовані світлодіодами, які випромінюють в області спектру $(0,3 - 1,1)$ мкм, з квадратними діафрагмами на виході, а реперні знаки A_1 і A_2 сформовані квадратними діафрагмами, за якими встановлюються хімічні грілки, які формують зображення цих знаків в спектральному діапазоні $(8 - 14)$ мкм. Центри усіх реперних знаків розміщені на одній лінії Y , а базові відстані $B_{ТП}$ і $B_{ТВП}$, що сформовані

центрами квадратів, виміряні і паспортизовані: $A_1A_2 = B_{ТП}$, а $B_1B_2 = B_{ТВП}$.

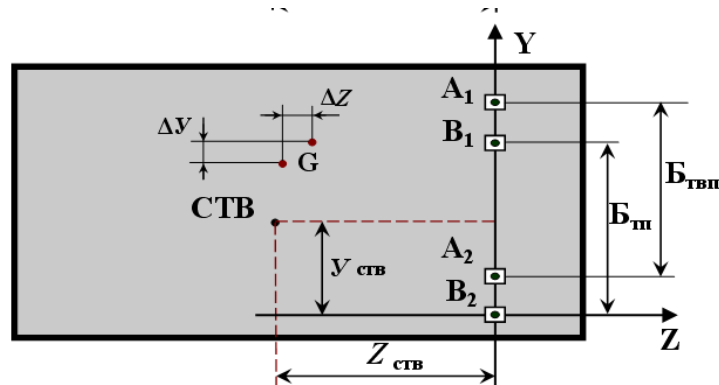


Рисунок 3.11 - Розмітка щита

Алгоритм перевірконої стрільби телевізійного прицілу в цьому випадку виконується таким чином.

На дистанції s передньої межі чіткого бачення прицілів встановлюється щит за допомогою виска так, що лінія Y займає вертикальне положення. Віссю Z є горизонталь, яка проходить через нижній реперний знак (на рис. 3.11 це B_2). Таким чином на щиті сформована система координат YZ . Спостерігаючи висок в телевізійний приціл, оператор-випробувач усуває можливий завал НРК. Після чого нівелюється ствол зброї за допомогою рівня, який інсталується на ствол зброї за допомогою спеціального корпусу з V-подібною направляючою із противідкидним елементом у вигляді циліндричного стрижня.

Виконується серія пострілів у щит, і відмічається СТВ. Вимірюються лінійні координати СТВ($y_{СТВ}$; $z_{СТВ}$) в системі координат YZ .

Вмикається телевізійний приціл, і в площині цифрового приймача відображаються реперні знаки B'_1 і B'_2 у вигляді квадратів (рис. 3.12). Центральний піксел G' приймача відповідає центру прицільної марки телевізійного прицілу на екрані монітору. Таким чином, визначивши центри квадратів, можна вирахувати лінійні координати лінії прицілювання $G'(y'_{ГП}; z'_{ГП})$ в системі координат

$Y'Z'$, де вісь Y' визначається відрізком $B'_1B'_2$, а вісь Z' – горизонтальним рядом пікселів, який проходить через центр реперного знаку B'_2 :

$$y'_{ГТП} = ma, \quad z'_{ГТП} = na,$$

де a – шаг пікселя цифрового приймача телевізійного прицілу, m – кількість пікселів в рядку між горизонтальною віссю симетрії цифрового приймача і центром реперного знаку B'_2 , n – кількість пікселів в строчці між вертикальною віссю симетрії цифрового приймача і відрізком $B'_1B'_2$.

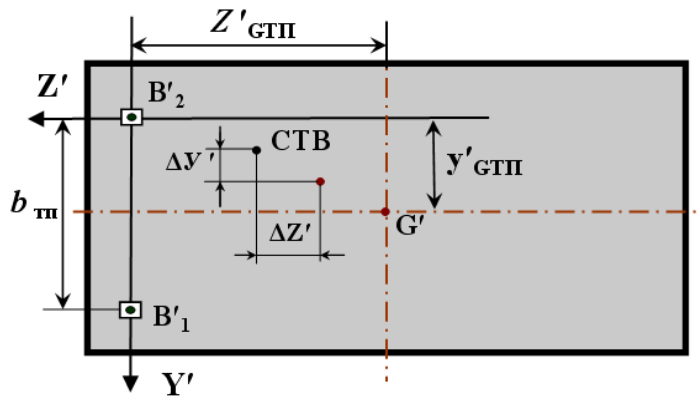


Рисунок 3.12 - Зображення на цифровому приймачі

В першому варіанті розвитку алгоритму, за відомими законами геометричної оптики перераховують визначене положення прицільної марки на цифровому приймачі $G'(y'_{ГТП}; z'_{ГТП})$ у систему координат YZ на щиті $G(y_{ГТП}; z_{ГТП})$ за формулами:

$$y_{ГТП} = y'_{ГТП} s/f'_{ТП} = mas/f'_{ТП}; \quad z_{ГТП} = z'_{ГТП} s/f'_{ТП} = nas/f'_{ТП}, \quad (3.1)$$

де: $f'_{ТП}$ – фокусна відстань об'єктиву телевізійного прицілу.

Порівнюють ці значення з проектними значеннями координат $G(y_{ГТПБМ}; z_{ГТПБМ})$ оптичної осі прицілу відносно осі каналу ствола зброї БМ:

$$\Delta y = y_{ГТПБМ} - y_{ГТП}; \quad \Delta z = z_{ГТПБМ} - z_{ГТП}. \quad (3.2)$$

Похибка положення лінії прицілювання у кутовій мірі визначиться за формулою:

$$\delta_{ПС} = [(\Delta y/s)^2 + (\Delta z/s)^2]^{1/2}. \quad (3.3)$$

Аналогічно визначається похибка положення лінії прицілювання тепловізійного прицілу за допомогою реперних знаків A_1 і A_2 .

В другому варіанті розвитку алгоритму перераховують положення СТВ на щиті $(y_{CTB}; z_{CTB})$ у систему координат $Y'Z'$ $(y'_{CTB}; z'_{CTB})$ на цифровому приймачі за формулами:

$$y'_{CTB} = y_{CTB} f_{TP} / s; \quad z'_{CTB} = z_{CTB} f_{TP} / s. \quad (3.4)$$

Порівнюють ці значення з проектними значеннями координат осі каналу ствола зброї $(y'_{OKC}; z'_{OKC})$ відносно центрального пікселя цифрового приймача тепловізійного каналу:

$$\Delta y' = y'_{OKC} - y'_{CTB}; \quad \Delta z' = z'_{OKC} - z'_{CTB}. \quad (3.5)$$

Похибка положення лінії прицілювання у кутовій мірі визначиться за формулою:

$$\delta_{PC} = [(\Delta y' / f_{TP})^2 + (\Delta z' / f_{TP})^2]^{1/2}. \quad (3.6)$$

Аналогічно визначається похибка положення лінії прицілювання тепловізійного прицілу за допомогою реперних знаків A_1 і A_2 .

Як було відмічено вище, реперні знаки відображаються в площинах цифрових приймачів тепловізійного і тепловізійного прицілів у вигляді квадратів, а задля розрахунку координат ліній прицілювання на щиті необхідно знати їхні центри. Принцип розрахунку центрів квадратів A'_1 , A'_2 , B'_1 і B'_2 в площині цифрових приймачів полягає в перетворенні вихідного півтонового зображення в бінарне [5] і в наступному обчисленні координат центру отриманої геометричної фігури в системі координат приймача. При цьому існує декілька методів таких розрахунків. Найбільш точним є метод обчислення енергетичного центру зображення квадрату з субпіксельною точністю – без округлення виміряних координат y'_{KB} , z'_{KB} , а рівень сигналу в пікселі I_{ij} в i -й строчці і j -му стовбці приймає дійсне значення, отримане при зчитуванні з цифрового приймача:

$$y'_{\hat{E}\hat{A}} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n I_{ij} j / \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n I_{ij}, \quad (3.7)$$

$$z'_{\hat{E}\hat{A}} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n I_{ij} i / \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n I_{ij}. \quad (3.8)$$

Як видно, для точного розрахунку координат проекції лінії прицілювання на щиті за формулами (3.1) і (3.3) і розрахунку положення СТВ на цифровому приймачі за формулами (3.4) і (3.6) необхідно точне значення параметру s . Для цієї мети і були паспортизовані значення $B_{ТП}$ і $B_{ТВП}$. З рис. 3.12 видно, що відстань $b_{ТП}$ між центрами зображень B'_1 і B'_2 квадратів в площині цифрового приймача телевізійного прицілу становить:

$$b_{ТП} = y'_{KB1} + y'_{KB2}.$$

Використовуючи параметр $b_{ТП}$ як базу зовнішньо-базового далекоміру, знайдемо шукану дистанцію s за формулою: $s_{ТП} = B_{ТП} f'_{ТП} / b_{ТП}$. Аналогічно $s_{ТВП} = B_{ТВП} f'_{ТВП} / b_{ТВП}$. Похибка вимірювання дистанції визначається похибкою вимірювання параметру B (0,5 мм), похибкою паспортного значення фокуса об'єктиву (1%) і похибкою вимірювання параметру b (половина пікселя). В результаті похибка вимірювання дистанції до телевізійного прицілу становить 30,6 мм (0,12%), а до тепловізійного прицілу – 60 мм (0,24%) і цією похибкою можна нехтувати.

До основних джерел похибок, які впливають на похибку контролю при перевіірочній стрільбі за цим алгоритмом, можна віднести:

- похибку γ приведення щита у вертикальне положення за допомогою виска;
- похибку $\delta_{БАЗ}$ внаслідок неоднозначності інсталяції рівня на зброї;
- похибку $\delta_{НІВ}$ нівелювання зброї, обумовлена точністю рівня;
- похибку $\delta_{СТВ}$ визначення середньої точки влучення;
- похибку δ_{YZCTB} визначення координат СТВ в системі координат щита;
- похибку $\delta_{РОЗ}$ розмітки щита (вимірювання базових відстані $B_{ТП}$ і $B_{ТВП}$);
- похибку δ_{KB} автоматичного визначення координат центрів реперних міток в площині цифрового приймача.

Базові відстані $B_{ТП}$ і $B_{ТВП}$ дорівнюють приблизно висоті щита l , яка становить до 1 м, для того щоб перекрити діапазон віддалення прицілів від зброї. При використанні виступу для приведення щита у вертикальне положення і візуальному контролю несуміщення тонкої нитки з центром нижнього репера з використанням металевої лінійки похибка вертикальності осі Y визначиться за формулою $\gamma = 0,001/2l$ і становитиме 0,5 мрад.

Якщо при вимірюванні координат СТВ в системі координат YZ використовується металева лінійка з ціною поділу 1 мм, то похибка вимірювання становитиме 0,5 мм без врахування похибки γ .

Координати СТВ (y'_{YZCTB} ; z'_{YZCTB}) у неvertикальній системі координат і координати (y_{YZCTB} ; z_{YZCTB}) у вертикальній системі координат зв'язані відомою системою рівнянь:

$$z'_{YZCTB} = z_{YZCTB} \cos \gamma + y_{YZCTB} \sin \gamma;$$

$$y'_{YZCTB} = -z_{YZCTB} \sin \gamma + y_{YZCTB} \cos \gamma.$$

Враховуючи мале значення кута γ , систему рівнянь можна представити так:

$$z'_{YZCTB} - z_{YZCTB} = \gamma y_{YZCTB} = 0,0005 y_{CTB};$$

$$y_{YZCTB} - y'_{YZCTB} = \gamma z_{YZCTB} = 0,0005 z_{CTB}.$$

Якщо прийняти до уваги, що максимальне віддалення прицілів від зброї БМ не перевищує 500 мм, а відстань нижнього репера від осі зброї не перевищує 100 мм, то сумарна похибка δ_{YZCTB} визначиться за формулою $\delta_{YZCTB} = [(0,5 + 0,0005 y_{CTB}/s)^2 + (0,5 + 0,0005 z_{CTB}/s)^2]^{1/2}$ і становитиме 6".

При визначенні координат центрів квадратів в площині цифрового приймача за формулами (3.7) і (3.8) похибка δ_{KB} визначиться залежністю: $\delta_{KB} = 0,5a/f'$. Якщо врахувати, що фокусна відстань об'єктиву телевізійного прицілу становить 50 мм, а розмір пікселя ПЗЗ-матриці становить 2 мкм, то $\delta_{KBТП}$ не перевищить 4"; якщо фокусна відстань об'єктиву тепловізійного прицілу становить 100 мм, а розмір пікселя ПЗЗ-матриці становить 17 мкм, то $\delta_{KBТП}$ не перевищить 17".

Значення інших похибок аналогічні похибкам алгоритму 1.

Приймаючи до уваги, що окремі похибки δ_i ($i = 6$) незалежні друг від друга, то сумарна похибка $\delta_{ПС}$ контролю при перевірочній стрільби за цим алгоритмом визначиться наступною формулою $\delta_{ПС} = (\sum \delta_i^2)^{1/2}$ і становить 32,8" для телевізійного прицілу і 36,8" для тепловізійного прицілу.

Таким чином, алгоритм 2 забезпечує точність контролю на (17 - 26)% вищу, ніж методика 1, але не в повній мірі задовольняє вимогам точності до перевірочної стрільби.

Алгоритм 3

Аналізуючи складові похибок, видно, що на точність контроль також впливає похибка визначення СТВ, пов'язана із ручним вимірюванням. Розглянемо можливість автоматизації і цього процесу із застосуванням телевізійного прицілу.

Помітимо, що при пробиванні пластикового щита кулею калібру 7,62 мм на малій відстані в ньому утворюються чіткі отвори такого ж діаметру. Якщо щит має чорний колір, то ці отвори на світлому фоні за щитом будуть відображатись в площині чутливого приймача телевізійного прицілу у вигляді плям з контрастом близьким до 1. Діаметр плям становитиме 15 мкм. При розмірі пікселя 2 мкм зображення вписується в квадрат з 64 пікселів. При застосуванні розглянутого вище принципу розрахунку центрів плям в площині цифрового приймача з субпіксельною точністю можна отримати координати центрів кожної плями з точністю 1 мкм. Методика визначення СТВ при чотирьох плямах передбачає 3 розрахунки [18], тобто похибка $\delta_{СТВ}$ буде визначатись за формулою $\delta_{СТВ} = 0,003/f_{ТП} = 12''$. З урахуванням цього $\delta_{ПС}$ становитиме 18" для телевізійного прицілу і 24,4" для тепловізійного прицілу.

Таким чином, алгоритм 3 забезпечує точність контролю на (44 – 59)% вищу, ніж алгоритм 1 і задовольняє вимогам точності до перевірочної стрільби.

3.7 Апаратура контролю стабільності лінії прицілювання в процесі експлуатації

Конструктивною особливістю БМ НРК є велика (в межах (100 – 500) мм) базова відстань вхідної зіниці прицілів від ствола зброї. При експлуатації цих БМ виникає завдання періодичного контролю, тобто визначення і усунення можливого відхилення кутового положення лінії прицілювання відносно осі каналу ствола зброї – «холодне» пристрілювання за допомогою СК.

Враховуючи спектральні діапазони роботи телевізійного і тепловізійного прицілів, СК має будуватись на основі дзеркального коліматора 1 (рис. 3.13), синтезованого в підрозділах 3.4.2, 3.4.3, який кріпиться до стрижня-калібру 2, і дзеркального вузла 3, який містить два пента-дзеркала 4 і 5 [20]. Пента-дзеркало 4 розміщене на оптичній вісі коліматора 1 і віддзеркалює оптичну вісь під кутом 90° . Пента-дзеркало 5 розміщене на відбитій оптичній вісі з можливістю зміни базової відстані L і віддзеркалює оптичну вісь під кутом 90° в бік прицілу 6. Специфіка роботи пента-дзеркала в тому, що воно зберігає стабільність кута 90° між вхідним і вихідним променем незалежно від своєї орієнтації відносно оптичної системи, яка формує вхідний промінь. Таким чином, в процесі переміщення пента-дзеркала 5 вздовж його бокової площини зберігається колінеарність відбитої оптичної вісі коліматора і осі каналу ствола зброї 7.

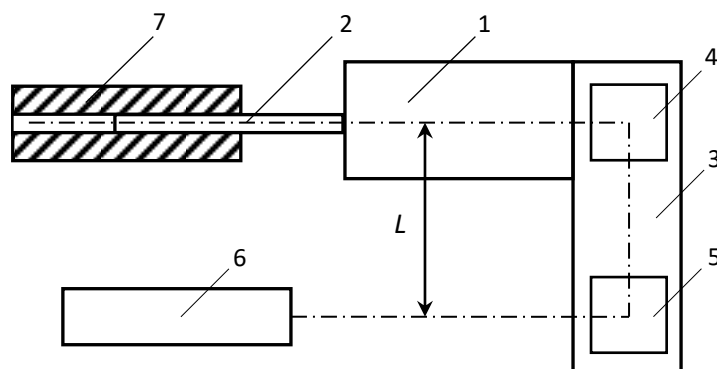


Рисунок 3.13 - Ствольний коліматор на базі дзеркальної оптики: 1 – коліматор, 2 – стрижень-калібр, 3 – дзеркальний вузол, 4, 5 – пента-дзеркала, 6 – приціл, 7 – ствол зброї

Похибка «холодного» пристрілювання при такому конструктивному виконанні СК визначається похибкою положення лінії прицілювання внаслідок неоднозначності установки СК у ствол зброї, похибкою відліку з-за дискретності відлікової шкали на моніторі, а також похибками виготовлення пента-дзеркал. Значення окремих помилок, що викликають похибку визначення положення лінії прицілювання при використанні ствольного СК, представлено в таблиці 3.3 [9].

Таблиця 3.3

Похибки визначення положення лінії прицілювання при використанні СК

Найменування похибки	Значення
Похибка положення лінії прицілювання внаслідок неоднозначності базування стрижня-калібру у стволі зброї - $\Delta\alpha_{баз}$	54"
Похибка виготовлення пента-дзеркала - $\Delta\alpha_{п-дз}$	1"
Похибка відліку, викликана дискретністю відлікової шкали на екрані монітору - $\Delta\alpha_{дискр}$	30"

З урахуванням цього сумарна похибка «холодного» пристрілювання визначається формулою:

$$(\Delta\alpha_{\Sigma})_{ХП} = [(\Delta\alpha_{баз})^2 + 2(\Delta\alpha_{п-дз})^2 + (\Delta\alpha_{дискр})^2]^{1/2}$$

і становить 62,7".

Таким чином, СК запропонованої конструкції дозволяє проводити «холодне» пристрілювання при різній базовій відстані між зброєю і прицілом, а застосування дзеркальної оптики дозволяє пристрілювати приціли, які працюють у видимій і дальній інфрачервоній областях спектру.

В разі компоновки ППС в двох корпусах при $R=\text{const}$ (рис. 2.14) у вузлі 3 використовується ромб-призма БС-0°, виготовлена з сульфиду цинку або селеніду цинку, прозорих в області спектру (0,4 - 14) мкм. Специфіка роботи ромб-призми в паралельних пучках променів забезпечує колінеарність вхідного і вихідного променя при

довільному положенні призми. Тому при обертанні навколо оптичної осі об'єктиву коліматора 1 призма послідовно точно передаватиме зображення контрольної мітки у вхідну зіницю телевізійного або тепловізійного прицілу.

Висновки

1. Для контролю лінії прицілювання бойових модулів НРК в процесі виробництва необхідна спеціальна контрольно-юстувальна апаратура. Використання сучасних позиційно-чутливих цифрових фотоприймачів та світлодіодів при її побудові дозволяє створити апаратуру, що забезпечує контроль лінії прицілювання з похибкою 4 секунди.
2. Для контролю лінії прицілювання бойових модулів НРК в процесі стендових випробувань необхідна апаратура на базі колімаційно-вимірювального блоку і ударного стенду. Використання дзеркальної оптики при її побудові і автоматизація процесів вимірювання дозволяє створити апаратуру, що забезпечує контроль лінії прицілювання з похибкою 7,51 секунди.
3. Для контролю лінії прицілювання бойових модулів НРК в процесі перевірконої стрільби необхідно використовувати мішені спеціальної конструкції. При використанні мішені з системою реперних знаків, що формують зображення квадратів у видимій та інфрачервоній областях спектру, і автоматичному визначенні середньої точки влучання забезпечується контроль лінії прицілювання з похибкою 18 секунд для телевізійного прицілу і 24,4 секунди для тепловізійного прицілу.
4. Для контролю лінії прицілювання телевізійного і тепловізійного прицілів різних типів НРК в процесі експлуатації необхідно використовувати ствольний коліматор на базі дзеркальної оптики. При використанні двох пента-дзеркал, одне з яких є рухомим, забезпечується контроль лінії прицілювання з похибкою 62,7 секунди при базовій відстані між зброєю і прицілами в діапазоні (100 - 500) мм.

Література до розділу 3

1. Бирюков. Е. Эволюция датчиков изображения: от ПЗС к КМОП/ Бирюков. Е. // Компоненты и технология. – 2007. - №10. – с. 24-27.
2. Мельник О.Д. Юстування і стендові випробування бойових модулів роботизованих комплексів / Мельник О.Д., Сенаторов В.М. // Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. №4 (71) / 2018. – с. 179-188.
3. DFB Quantum Cascade Laser 10,8 μm , 3 mW. Проспект фірми Frankfurt Company. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.FRLASER.com. Дата звернення 01.06.2021.
4. Неуймін О.С. ПЗЗ-матриці / Неуймін О.С., Дяченко С.М.//Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. – 2010. № 41. с. 182 – 190.
5. Мельник О.Д. Юстування і стендові випробування бойових модулів роботизованих комплексів / Мельник О.Д., Сенаторов В.М.// Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. №4 (71)/2018. – с. 179-188.
6. Мельник О.Д. Апаратура для юстування бойових модулів роботизованих комплексів / Мельник О.Д., Сенаторов В.М.// Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. №4 (71) / 2018. – с. 173-178.
7. Афанасьев В.А. Оптические измерения / Афанасьев В.А. // М.: «Недра». 1981 – 232 с.
8. Ананьев И.Н. Основы устройства прицелов /Ананьев И.Н. // М.: Военное издательство Министерства Вооруженных сил Союза ССР, 1947. - 440 с.
9. Сенаторов В.М. «Холодне» пристрілювання оптичних приладів бойових роботизованих комплексів / Сенаторов В.М., Довгополий

А.С., Гурнович А.В. та ін. // Озброєння та військова техніка: Науково-технічний журнал. - Київ: ЦНДІ ОВТ ЗСУ. – 2018. -№ 3(19) 2018.- С. 47-51, [http://doi.org/10.34619/2414-0651.2018.3\(19\)](http://doi.org/10.34619/2414-0651.2018.3(19)). С. 47-51.

10. *Сенаторов В.М.* Контроль положения линии прицеливания бойових модулів наземних робототехнічних комплексів / В.М.Сенаторов, О.Д.Мельник, І.В.Борохвостов та ін. // Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. №3 (82)/2021. – С. 37-48.

11. *Бутримов И.С.* Разработка и исследование оптико-электронного комплекса для контроля положения линии визирования прицелов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бутримов И.С. // ФГУ «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», Новосибирск, 2016. - 20 с. 127063 (Україна). Пристрій для кругового сканування.

12. Патент на корисну модель №143764. Пристрій для контролю положення лінії візування оптичного прицілу на стрілецькій зброї. Автори Білокур М.О., Гупало А.Ю, Мельник О.Д., Сенаторов В.М. – 2020. – Бюл. № 15.

13. *Микитенко В.І.* Оптико-електронний комплекс контролю положення лінії візування оптичного прицілу / В.І.Микитенко, В.М.Сенаторов, О.Д.Мельник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». – 2019. – Вип. 58. – С.15 – 22. DOI: [https://doi.org/10.20535/1970.58\(2\).2019.189261](https://doi.org/10.20535/1970.58(2).2019.189261).

14. Справочник конструктора оптико-механических приборов, под ред. *Кругера М.Я.* и *Панова В.А.* - Л-д: «Машиностроение», 1967.- 760 с.

15. *Сенаторов В.М.* Перевірочна стрільба для контролю бойових модулів наземних роботизованих комплексів/ Сенаторов В.М., О.Д.Мельник, А.В.Гурнович та ін. // Збірник наукових праць ЦНДІ ОВТ ЗСУ. - №4(83)/2021. – С. 16-24.

16. Наставление по стрелковому делу. Основы стрельбы из стрелкового оружия; 7,62-мм модернизированный автомат Калашникова (АКМ и АКМС); 7-62мм ручной пулемет Калашникова (РПК и РПКС); 7-62мм пулемет Калашникова (ПК, ПКС, ПКВ и ПКТ); 9-мм пистолет Макарова (ПМ); Ручные гранаты. – Изд. 3-е, М.: Воениздат, 1985. - 640 с.
17. Устройство для контроля положения линии визирования прицелов на стрелковом оружии: пат. 2536570 Рос. Федерации: МПК F41G 1/54, G02B 23/00. Бюл. № 36, 2014.
18. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации: РМГ 63-2003. Утв. 05.12.2003 Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации.
19. Вогнева підготовка. Навчальний посібник (з методичними рекомендаціями). Підготовка стрілецької зброї і протитанкового гранатомета до стрільби та прийоми і правила стрільби з них. Київський національний університет ім. Тараса Шевченка. Військовий інститут, 2006. – 177 с.
20. Патент на корисну модель № 127980 (Україна). Пристрій для «холодної» пристрілки оптикоелектронного прицілу. Автори Довгополий А.С., Гурнович А.В., Гусляков А.М., Сенаторов В.М. – 2018. – Бюл. № 16.