

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний
Комп'ютерно інтегрованих оптичних та навігаційних систем

«На правах рукопису»
УДК 681.7(013)

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Н. І. Бурау
« ____ » _____ 2022 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-кваліфікаційною програмою « комп'ютерно інтегровані
системи та технології в приладобудуванні**

**зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Автоматизація керування лазерним променем для
спостереження за рухомими об'єктами)»**

Виконав:
студент II курсу, групи ПО-11мп
Білик Микола Сергійович

Керівник:
к. т. н., доцент,
Кучеренко Олег Костянтинович

Консультант з розроблення стартап-проекту:
Професор кафедри економічної кібернетики,
д.е.н., професор Бояринова Катерина Олександрівна

Рецензент:
к.т.н., доцент кафедри ВП
Терещенко М. Ф.

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

Здобувач _____

Київ – 2022 рік

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Рівень вищої освіти –другий (магістерський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«__»_____20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента
Білика Миколи Сергійовича**

1. Тема дисертації «Автоматизація керування лазерним променем для спостереження за рухомими об'єктами»,
науковий керівник дисертації Кучеренко Олег Костянтинович, канд. техн. наук, доцент затверджені наказом по університету від «__»_____20__ р.
№_____

2. Термін подання студентом дисертації «_10_» грудня 2022 р.

3. Об'єкт дослідження _процеси керування складними технічними об'єктами .

4. Предмет дослідження: розробка автоматизованої системи керування лазерним променем.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

5.1. Огляд систем спостереження за об'єктом що використовують керування лазерним променем. Визначення недоліків таких систем.

5.2. Обґрунтування запропонованої автоматизованої системи керування лазерним променем.

5.3 Дослідження характеристик акустооптичних дефлекторів для автоматизованого керування лазерним променем.

5.4. Дослідження методів розширення кутового діапазону відхилення лазерного променя акустооптичним дефлектором.

5.5. Особливості проектування акустооптичного дефлектора.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу презентація в програмі PowerPoint: схеми і теоретичні співвідношення, завдяки яким викладаються зміст і основні висновки результатів дослідження при виконанні магістерської дисертації.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

- патент на запропоновану систему автоматизованого керування;
- статті в збірнику праць науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування».

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проекту	Бояринова К.О. д.е.н., проф.; завідувач кафедри економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського		

9. Дата видачі завдання 31.10. 2022р _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд систем спостереження за об'єктом що використовують керування лазерним променем. Визначення недоліків таких систем.	05.11.22р	05.11.22р
2	Обґрунтування запропонованої автоматизованої системи керування лазерним променем.	08.11.22р	08.11.22р
3	Дослідження характеристик акустооптичних дефлекторів для автоматизованого керування лазерним променем.	16.11.22р	16.11.22р
4	Дослідження методів розширення кутового діапазону відхилення лазерного променя акустооптичним дефлектором.	22.11.22р	22.11.22р
5	Особливості проектування акустооптичного дефлектора.	02.12.22р	02.12.22р
6	Підготовка до захисту магістерської дисертації	10.12.22р	10.12.22р

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Автоматизація керування лазерним променем для
спостереження за рухомими об'єктами)»

Київ – 2022 року

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація на тему «Автоматизація керування лазерним променем для спостереження за рухомими об'єктами». В ході роботи було досліджено сучасні системи керування лазерним променем які використовуються в протитанкових ракетних комплексах. Запропоновано автоматизовану систему керування лазерним променем. Досліджено характеристики акустооптичних дефлекторі для керування лазерним променем. Проведено дослідження методів розширення кутового діапазону відхилення лазерного променя акустооптичним дефлектором. Розглянуто особливості проектування акустооптичного дефлектора.

Дисертаційна робота містить 4 розділи, налічує 88 сторінок друкованого тексту без додатків. Робота включає в себе 29 таблиць, 32 рисунки, 2 додатки, та список використаних джерел у кількості 31 одиниці літератури.

В першому розділі проекту виконано огляд існуючих систем спостереження за об'єктом, що здійснюють керування лазерним променем. Визначено недоліки існуючих систем. Запропонований новий метод автоматизації керування лазерним променем з використанням акустооптичного дефлектора.

В другому розділі розглянутий принцип дії акустооптичного дефлектора і його основні характеристики. Проведено ґрунтовний аналіз матеріалів, які можуть бути використані для реалізації акустооптичного дефлектора. Запропонована методика попереднього розрахунку параметрів акустооптичного дефлектора для лазерно-променевої системи наведення ракет. проведено аналіз можливих вирішень недоліків існуючих систем керування лазерним променем. Обрано метод вирішення визначених недоліків. Обґрунтовано обрану систему керування та наведено характеристики акустооптичних дефлекторів для керування лазерним променем.

В третьому розділі проведено дослідження можливих методів розширення кутового діапазону відхилення лазерного променя

акустооптичним дефлектором при використанні кристалу парателлуриту, який має дуже високу акустооптичну активність. Розглянуто особливості проектування акустооптичного дефлектора.

В четвертому розділі розроблено стартап проект та проаналізовано можливості і стратегії його реалізації.

Ключові слова: лазерно-променева система наведення, система керування орієнтацією лазерного променя, акустооптичний дефлектор, методика розрахунку, парателлурит.

ABSTRACT

Master's dissertation on "Automation of laser beam control for tracking moving objects". In the course of the work, modern laser beam control systems used in anti-tank missile systems were investigated. An automated laser beam control system is proposed. The characteristics of acousto-optic deflectors for controlling a laser beam were studied. Methods of expanding the angular range of deflection of a laser beam by an acousto-optic deflector have been researched. The design features of the acousto-optic deflector are considered.

The dissertation contains 4 chapters, totals 88 pages of printed text without appendices. The work includes 29 tables, 32 figures, 2 appendices, and a list of used sources in the amount of 31 units of literature.

In the first section of the project, an overview of the existing object observation systems, which control the laser beam, was performed. The shortcomings of the existing systems are identified. A new method of automating laser beam control using an acousto-optic deflector is proposed.

In the second section, the principle of operation of the acousto-optic deflector and its main characteristics are considered. A thorough analysis of the materials that can be used to implement the acousto-optic deflector has been carried out. A method of preliminary calculation of the parameters of the acousto-optic deflector for the laser-beam missile guidance system is proposed. an analysis of possible solutions to the shortcomings of the existing laser beam control systems was carried out. The

method of solving the identified shortcomings has been chosen. The selected control system is substantiated and the characteristics of acousto-optic deflectors for laser beam control are given.

In the third section, a study of possible methods of expanding the angular range of laser beam deflection by an acousto-optic deflector using a paratellurite crystal, which has a very high acousto-optic activity, was conducted. The design features of the acousto-optic deflector are considered.

In the fourth section, a startup project is developed and opportunities and strategies for its implementation are analyzed.

Key words: laser beam guidance system, laser beam orientation control system, acousto-optic deflector, calculation method, paratellurite. In the third section, a study of possible methods of expanding the angular range of laser beam deflection by an acousto-optic deflector is carried out. The design features of the acousto-optic deflector are considered.

In the fourth section, a startup project was developed and the possibilities and strategies for its implementation were analyzed.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	5
ABSTRACT	6
Перелік умовних значень і скорочень	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ І	14
ОГЛЯД СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ОБ'ЄКТОМ (ЦІЛЛЮ), ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ	14
1.1. Принцип дії і характеристики напіваавтоматичних систем керування лазерним променем	14
1.2. Принцип дії і характеристики автоматичних систем.....	26
1.3. Принцип дії і переваги системи керування лазерним променем з використанням акустооптичного дефлектора.....	32
Висновки до першого розділу	37
РОЗДІЛ II.....	38
ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТООПТИЧНИХ ДЕФЛЕКТОРІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ	38
2.1. Принцип дії акустооптичних дефлекторів.....	38
2.2. Характеристики матеріалів які використовуються для виготовлення акустооптичних дефлекторів	43
2.2.1 Акустооптичні дефлектори на основі халькогенідних стекел ...	43
2.2.2 Акустооптичні дефлектори на основі анізотропних матеріалів	45
2.2.3 Інші перспективні матеріали для виготовлення акустооптичних дефлекторів.....	48
2.3. Визначення параметрів акустооптичних дефлекторів	51
. Висновки до другого розділу	53
РОЗДІЛ III	55
Розширення кутового діапазону і особливості проектування акустооптичного дефлектора для ЛПСН	55
3.1. Розширення кутового діапазону акустооптичного дефлектора	55
3.2 Особливості проектування акустооптичного дефлектора для ЛПСН	62
Висновки до третього розділу.....	68
РОЗДІЛ IV.....	69

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ».....	69
4.1. Опис та технологічний аудит ідеї проєкту	69
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	72
4.3 Розроблення ринкової стратегії проєкту	79
4.4 Розроблення маркетингової стратегії стартап-проєкту	81
Висновки до четвертого розділу.....	85
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	86
Список використаних джерел	88
ДОДАТКИ.....	90
ДОДАТОК А.....	91
СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Білика Миколи Сергійовича	91
ДОДАТОК Б	92
Презентація дисертації.....	Помилка! Закладку не визначено.

Перелік умовних значень і скорочень

ПТРК – Протитанковий ракетний комплекс

ПТКР – Протитанкова керована ракета

ІЧ – Інфрачервоний

ТПВ - Тепловізійний

ЛПСН – Лазерно-променева система наведення

ФПП – Фотоприймальний пристрій

ЛВЦ – Лінія візування цілі

АОД – Акустооптичний дефлектор

ПП – П'єзоперетворювач

ЕОЧХ – Електрооптична частотна характеристика

ВСТУП

Тема дипломного проекту: «Автоматизація керування лазерним променем для спостереження за рухомими об'єктами»

Актуальність роботи: системи керування лазерним променем активно використовуються в протитанкових ракетних комплексах першого та другого поколінь. На даний момент в умовах війни розробка власних сучасних протитанкових ракетних комплексів є дуже важливою. За статистикою на початок війни в лютому на озброєнні збройних сил України було близько 950 протитанкових ракетних комплексів різних типів, серед яких лише третина були вітчизняними. Навіть за умови тиші яка була до 24-го лютого запас комплексів був замалий.

Після початку війни кількість протитанкових ракетних комплексів суттєво зросла за рахунок закордонних комплексів таких як «Javelin» «NLAW» та інші. Завдяки закордонним комплексам на даний час можна вважати що їх кількість є достатньої для ураження цілей на всіх ділянках фронту.

Не дивлячись на широку різноманітність існуючих закордонних комплексів та власних розробок таких як «Корсар» та «Стугна-П» розробка власних технологічних протитанкових ракетних комплексів все ще актуальна. Технології не залишаються на місці і українські системи вже на мають такої високої технологічності, як мали б бути Також проблема полягає в вартості закордонних систем та проблем з логістикою через війну. Ще один важливий аспект полягає в тому що незалежність від закордонних поставок це дуже добрий крок до подальшого розвитку збройних сил та запобіганню наступним війнам.

Мета роботи: реалізація автоматичної системи керування лазерним променем для спостереження за рухомими об'єктами яка матиме підвищену швидкодію, розширений кутовий діапазон керування лазерним променем в порівнянні з іншими подібними системами

Завдання дослідження:

- проаналізувати існуючі системи керування лазерним променем. Визначити їх недоліки та методи їх усунення;
- розробити власну схему системи керування лазерним променем яка буде вирішувати недоліки попередніх систем;
- розглянути характеристики та матеріали для акустооптичних дефлекторів які використовуватимуться для керування лазерним променем;
- запропонувати методику розрахунку акустооптичних дефлекторів для ЛПСН;
- дослідити методи розширення кутового діапазону відхилення лазерного променя;
- дослідити особливості проектування акустооптичних дефлекторів.

Об'єкт дослідження: особливості керування лазерним променем.

Предмет дослідження: системи керування орієнтацією лазерного променя.

Наукова новизна: запропоновано автоматизовану систему керування лазерним променем з підвищеною швидкістю за рахунок використання акустооптичних дефлекторів в якості системи відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля.

Практична цінність: можливість створення нового протитанкового ракетного комплексу з використанням розробленої системи керування лазерним променем, яка буде мати підвищену швидкість відносно інших систем, є конструктивно простішою і технологічною та може бути в подальшому використана у військових цілях.

Апробація результатів дослідження: результати роботи, а також основні положення розглядались на XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у

майбутнє приладобудування», Київ 2021; XVII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», Київ, 2021; (Додаток А). Як підсумок дослідження було опубліковано та отримано патент на корисну модель: Пристрій відхилення лазерного променя для лазерно-променевої системи наведення: пат. 151132 Україна: МПК F41G7/24. № u202107080; заявл. 10.12.21; опубл. 08.06.22, Бюл. № 23. 6 с.

РОЗДІЛ І

ОГЛЯД СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ОБ'ЄКТОМ (ЦІЛЮ), ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ

1.1. Принцип дії і характеристики напіваавтоматичних систем керування лазерним променем

Зараз у всіх арміях світу основу проти танкової оборони становлять протитанкові ракетні комплекси (ПТРК) другого покоління з напіваавтоматичною (командною) системою наведення ракети та передачею на її борт команд управління з провідної лінії зв'язку.

У контурах командного наведення протитанкової керованої ракети(ПТКР) використовуються координати, призначені для автоматичного визначення по випромінюванню бортового оптичного випромінювача ракети її кутового неузгодженості щодо лінії візування цілі оператором ПТРК. Ці координатори відрізняються спектральними діапазонами роботи і принципами роботи сигналів керування. Характеристики координаторів наведено у табл. 1.1..

Аналіз даних, наведених у табл. 1.1., показує, що створені на цей час ПТРК другого покоління з напіваавтоматичними (командними) системами наведення відрізняються один від одного в основному типом координатора в контурі командного наведення ПТКР та його спектральним діапазоном роботи, а також принципами обробки сигналів. Модернізація ПТРК другого покоління проходить по шляху підвищення перешкодозахищеності систем наведення ПТКР за рахунок створення комбінованих (ІЧ та ТПВ) координаторів, вдосконалення методів обробки сигналів, а також збільшення швидкостей польоту ракет та надійності передачі команд управління на ПТКР за рахунок заміни провідної лінії зв'язку [1,2]. Бездротові ПТКР типу TOW-2A RF, TOW-2B RF, TOW-2B Aero RF та TOW Bunker Buster RF прийнято у 2006 році на озброєння США.

Таблиця 1.1.

Основні характеристики координаторів ПТРК

№ н/п	Тип ПТРК	Тип координатора	Спектральний діапазон роботи, мкм	Тип БОВ ПТРК	Частота модуляції випромінювання БОВ ПТРК, кГц	Принцип обробки сигналів в координаторі
1	TOW	Інфрачервоний (ІЧ)	0,6...1,2	Ксеноновий	5	Часовоімпульсна модуляція
2	"Milan"	ІЧ	0,6...1,1	На лампах розжарювання	9,5	Моноімпульсна обробка
3	HOT	ІЧ	1,8...2,7	Піротехнічний	Немодульований	Частотно-фазова модуляція
4	"Milan"	ІЧ	1,8...2,7	Піротехнічний	Немодульований	Частотно-фазова модуляція
5	TOW -2, -2A, -2B	ІЧ	0,6...1,2	Ксеноновий	5	Часовоімпульсна модуляція
		Тепловізійний (ТПВ)	8...14	Тепловий випромінювач	Керований БОВ з пускової установки ПТРК	Рядково кадрова обробка зображення

Розглянувши ПТРК закордонного виробництва не можна не звернути увагу на українські комплекси, «Корсар», та «Стугна-П» які наразі активно використовуються для ураження танків та інших броньованих цілей. Ці комплекси належать до другого покоління ПТРК тому варто розглянути їх детальніше.

ПТРК «Корсар» рис.1.1, призначений для ураження нерухомих та рухомих броньованих цілей та інших об'єктів, які мають комбіновану, рознесену або монолітну броню, у тому числі з динамічним захистом, а також малорозмірних цілей типу довготривалих вогневих точок, легкоброньованих об'єктів та гелікоптерів.

Комплекс комплектується ракетами у транспортно-пускових контейнерах з тандемною кумулятивною (РК-ЗК) та осколково-фугасною (РК-ЗОФ) бойовими частинами.

Комплекс дає можливість вести стрільбу з треноги або з упору з підготовлених та непідготовлених позицій як у денний, так і в нічний час із застосуванням тепловізора.



Рис. 1.1. ПТРК «Корсар»

ПТРК «Корсар» як і інші подібні комплекси містить два канали, канал наведення та канал спостереження за ціллю. За точність наведення пристрою відповідає прилад наведення ПН-КУ розроблений «Ізюмським приладобудівним заводом», в основі приладу наведення лежить монокуляр з віддаленою вихідною зіницею[3,4].

Головною особливістю в «Корсар», є те, що при своїх габаритах і масі він має напіваавтоматичну систему орієнтування керованої ракети в промені лазера з високою завадозахищеністю від впливу активних перешкод. Протитанкові ракети комплексу «Корсар» не вимагають підсвічування цілі

лазерним променем, а керуються шляхом орієнтування в інформаційному полі лазерного каналу керування за допомогою приймального пристрою, який знаходиться в хвостовій частині ракети.

ПТРК «Корсар» має такі технічні характеристики, рис. 1.2.[4]

Максимальная дальность стрельбы, м	2500
Система наведения	полуавтоматическая по лазерному лучу
Боевая часть:	
- танDEMная кумулятивная, бронепробиваемость за динамической защитой, мм	не менее 550
- осколочно-фугасная с ударным ядром, бронепробиваемость, мм	не менее 50
- термобарическая	
Масса, кг:	
- пусковая установка	12
- станок	8,3
- ракета в контейнере	15,5
Габаритные размеры, мм:	
- калибр ракеты	107
- длина контейнера	1180
- внешний диаметр контейнера	113
Температурный диапазон применения, °C	от минус 40 до +60

Рис. 1.2 Технічні характеристики ПТРК «Корсар»

«Стugna-П» — український ПТРК розроблений київським конструкторським бюро «Луч».

Комплекс належить до другого покоління ПТРК — він є напіваавтоматичним, із системою наведення по лазерному променю. Може вести вогонь ракетами калібру 130 мм або 152 мм з різними бойовими частинами, що встановлюються у контейнері.

Комплекс «Стugna-П», рис. 1.3. , призначений для ураження танків та інших броньованих цілей, в тому числі оснащених сучасними засобами динамічного захисту. Як виявила практика застосування «Стugna-П», ПТРК також здатний вражати статичні та маневрені повітряні цілі типу вертоліт.[5]

Комплекс оснащений напіваавтоматичною системою наведення за лазерним променем. Також можливе дистанційне керування ракетою по телевізійному каналу із закритої позиції (спеціально підготовленого укриття).

Однією з основних переваг ПТРК «Стугна-П» є те, що в якості каналу стеження за ціллю використана телевізійна камера. Це надає можливість дистанційного керування комплексом з укриття, що забезпечує безпеку для оператора і надає можливість більш варіативно використовувати комплекс в бою.



Рис 1.3. ПТРК «Стугна-П»

Комплекс «Стугна-П» комплектується ракетами калібру 130 мм, що встановлюються у транспортно-пусковому контейнері. Керована ракета може бути оснащена різними типами бойових частин: тандемною кумулятивною, осколково-фугасною або термобаричною. Характеристики ракет для комплексу показано на рис. 1.4.

Ракета	Калібр	Тип бойової частини	Бронепробивність	Кількість осколків
РК-2С	130 мм	тандемна кумулятивна	800 мм	
РК-2ОФ	130 мм	осколково-фугасна	60 мм	600 шт

Рис. 1.4. Характеристики ракет для ПТРК «Стugna-П»

Технічні характеристики ПТРК «Стugna-П» відмінні від характеристик ПТРК «Корсар» і наведені на рис. 1.5.

Максимальная дальность стрельбы, м	5000
Время полёта на максимальную дальность, с	16,8
Система управления	полуавтоматическая по лазерному лучу
Боевая часть:	
- тип	тандемная кумулятивная
- бронепробиваемость за динамической защитой, мм	не менее 550
Масса выстрела, кг	не более 24,5
Габаритные размеры, мм:	
- калибр ракеты	100
- длина выстрела	1196
Температурный диапазон применения, °С	от минус 40 до +60

Рис. 1.5. Техніні характеристики ПТРК «Стugna-П»

Основними вразливими до перешкод каналами ПТРК з напіваавтоматичними (командними) системами наведення є оператор, що супроводжує ціль протягом усього часу польоту ПТРК, та координатор у контурі командного наведення ракети. Для вирішення завдань придушення цих ПТРК танки та інші об'єкти бронетанкової техніки оснащуються комплексами електронно-оптичного активного захисту від високоточної зброї типу «Варта» (Україна), «LEDS-100 (США), MIDAS (Великобританія), Violin Mk1 (Ізраїль) [6], що дозволяють створювати некогерентні оптичні та маскуючі аерозольні перешкоди з об'єкту який захищають, рис. 1.6.. Однак через наявність жорстких масогабаритних і енергетичних обмежень ці комплекси не можуть бути встановлені на всіх, особливо плаваючих, легкоброньованих і неброньованих об'єктах, які є цілями ПТРК, а кількість цих об'єктів, наприклад, у мотострілецькій дивізії, у 2,5...2,8 рази перевищує

кількість танків, що оснащені комплексами електронно-оптичного активного захисту від високоточної зброї.



Рис. 1.6. Комплекс оптико-електронного захисту «Варта»

Крім того, для ефективного придушення ІЧ координаторів різних типів (табл. 1) необхідно мати набір випромінювачів перешкод, які частково або повністю перекривають спектральні діапазони роботи цих координаторів, а також створювати перешкоди на частоті модуляції цих ПТКР та забезпечувати енергетичні характеристики деяких оптичних перешкод протягом необхідного часу для всіх видів обробки сигналів в ІЧ координаторів [7].

Реалізація цих вимог, особливо в умовах жорстких обмежень на енергетику перешкод, що забезпечують застосування в кожному варіанті складної обстановки відповідних їм алгоритмів управління параметрами впливів перешкодами, вимагає рішення задачі поточної розвідки типу (класу)

і характеристик (параметрів) ПТРК. Однак датчики лазерного, що входять до складу комплексів електронно-оптичного активного захисту від високоточної зброї опромінення, призначені для видачі команд для постановки аерозольних перешкод оператору ПТРК, дозволяють виявляти тільки лазерні випромінювання далекомірів і цілепоказчиків, застосування яких за бойової роботи розрахунків ПТРК не передбачено [8].

Для усунення недоліків, властивих ПТРК другого покоління, зокрема пройшовших кілька етапів модернізації (прикладом може бути сімейство ПТРК типу TOW, рис. 1.7.), у низці провідних зарубіжних країн були розроблені та прийняті на озброєння ПТРК третього покоління, що реалізують принцип «бачу-стріляю» за допомогою лазерно-променевої системи введення(ЛПСН) ракет.



Рис. 1.7. ПТРК BGM-71 TOW

Принцип дії ЛПСН різних типів полягає у формуванні інформаційного поля управління ракетою, в кожній точці якого є дані про кутові координати ПТКР щодо лінії прицілювання, визначення цих координат на ракеті шляхом аналізу прийнятого лазерного випромінювання за рахунок установки в хвостовій частині ПТКР бортового фотоприймального пристрою (ФПП), орієнтації його поля зору у напрямку на пускову установку та дешифрацію

команд управління ПТКР. Залежно від способу супроводу цілі всі типи ЛПСН ракет можна розділити на два класи: командні (напівавтоматичні) і автоматичні ЛПСН ракет, а залежно від кількості одночасно обстрілюваних цілей – на одноцільові та багатоцільові ПТКР з командними лазерно-променевими системами наведення ракет.

Напівавтоматична (командна) ЛПСН, складається з каналів стеження за ціллю та ракетою. Спрощена структурна схема такої системи показана на рис. 1.8.

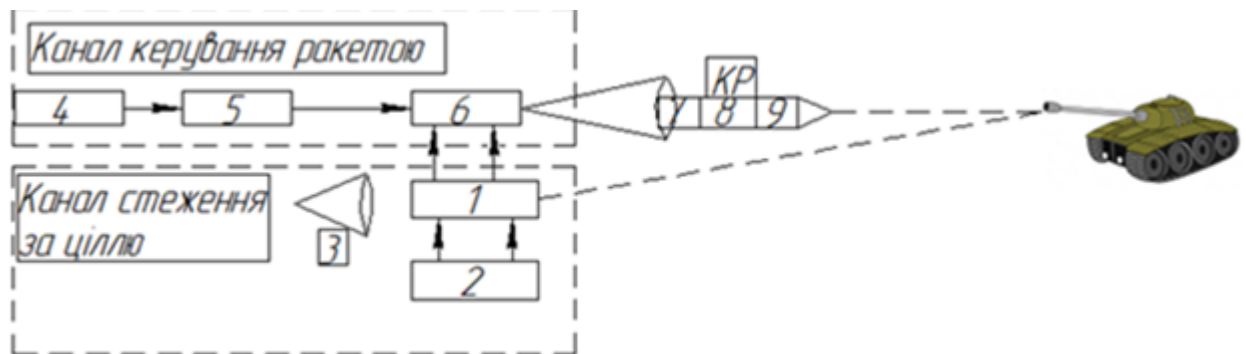


Рис. 1.8. Спрощена структурна схема командної ЛПСН :

1 – візирний пристрій; 2 – привід горизонтального та вертикального наведення; 3 – оператор; 4 – лазер; 5 – блок формування інформаційного поля; 6 – шифратор; 7 – фотоприймач; 8 – дешифратор; 9 – привід

Командна ЛПСН складається з двох каналів: каналу спостереження за ціллю та каналу наведення. Канал спостереження включає в себе візирний пристрій 1 з приводами горизонтального та вертикального наведення 2, та оператор 3. В якості візирного пристрою може використовуватися монокуляр або ж телевізійна система. В даній роботі буде використано монокуляр. Канал керування містить в собі джерело лазерного випромінювання 4, блок формування інформаційного поля випромінювання 5, та шифратор команд 6. На ракеті встановлюються фотоприймач 7, дешифратор команд 8, та привід 9[9].

Особливості бойового застосування ПТКР з командними ЛПСН ракет полягають у наступному. Оператор за допомогою оптико-візуального або

тепловізійного прицілу виявляє і розпізнає ціль, а потім після пуску ракети утримує перехрестя прицілу (прицільну мітку) на цілі протягом усього часу польоту ракети. У момент пуску ракета «встрілюється» в лазерний промінь і телеорієнтується по його осі, що збігається з лінією візування цілі (ЛВЦ) оператором. У лазерному промені формується інформаційне поле управління ракетою, якому вона утримується на ЛВЦ. Командні ЛПСН ракет відрізняються спектральними діапазонами роботи і принципами роботи сигналів.

Основні характеристики типових командних ЛПСН ракет, важливі з позицій їх комплексів електронно-оптичного активного захисту від високоточної зброї, наведені у табл. 1.2. З табл. 1.2. видно, що для передавання команд управління на ракету в ЛПСН використовуються напівпровідникові, твердотільні та газові лазери, працюючі на довжинах хвиль 0,9, 1,06 та 10,6 мкм, відповідно. При цьому найбільший енергетичний потенціал мають ЛПСН з моноімпульсними твердотільними лазерами.

Використання цих лазерів дозволяє реалізувати різні системи модуляції випромінювання для передачі на борт ракети кодованої інформації для підвищення завад захищеності лазерної лінії зв'язку з ракетою. Крім того, твердотільні лазери не вимагають додаткової рідинної системи охолодження, мають малу вагу та габарити і споживають невелику потужність. Спрощену функціональну схему ЛПСН з використання твердотільного моноімпульсного лазера показано на рис. 1.9.

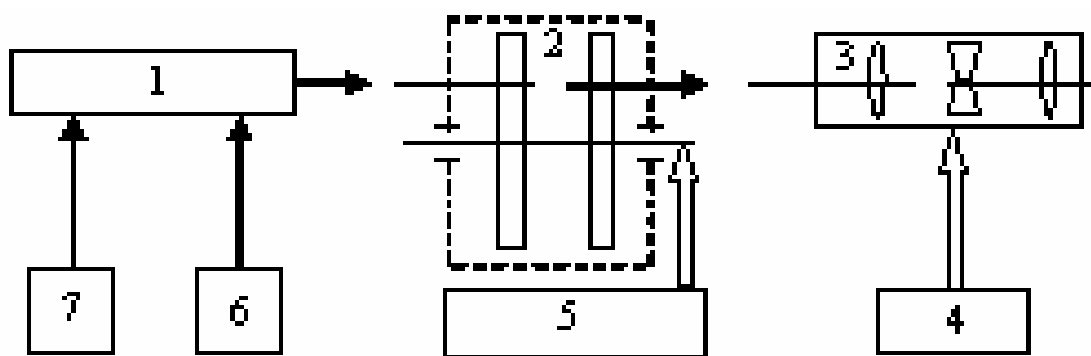


Рис. 1.9. Функціональна схема ЛПСН з використанням твердотільного моноімпульсного лазера:

1 – лазер; 2 – модулятор; 3 – об’єктив; 4,5 – приводи; 6 – система охолодження; 7 – джерело енергії

Таблиця 1.2.

Порівняльні характеристики напіваавтоматичних ЛПСН

Тип лазера	Режим роботи	Довжина хвилі лазерного випромінювання, мкм	Енергетичний потенціал, Дж	Діаметр вихідної зіниці, мм	Споживана потужність, Квт
Твердотільний	Неперервний	1,06	3	25-30	1,5
	Імпульсний з вільною генерацією, скануванням випромінювання	1,06	10-30	40-50	0,3
	Імпульсний з растровою модуляцією	1,06	20-30	15-20	0,3
	Моноімпульсний з поляризаційною модуляцією	1,06	600-800	15-20	0,3
	Моноімпульсний з часовоімпульсною модуляцією лініями затримки	1,06	90-1100	30-40	0,3
Напівпровідниковий	Імпульсний	0,9	2-3	40-50	0,05
Газовий	Моноімпульсний з часовоімпульсною модуляцією лініями затримки	10,6	30-40	40-50	0,2-0,4

Також досить цікавими для ЛПСН ракет є напівпровідникові лазери з імпульсним режимом роботи. Ці лазери відрізняються від лазерів інших видів

малими габаритними розмірами, високою ефективністю перетворення енергії імпульсу накачування, простотою здійснення модуляції. Функціональна схема такої ЛПСН розглянута на рис. 1.10(а).

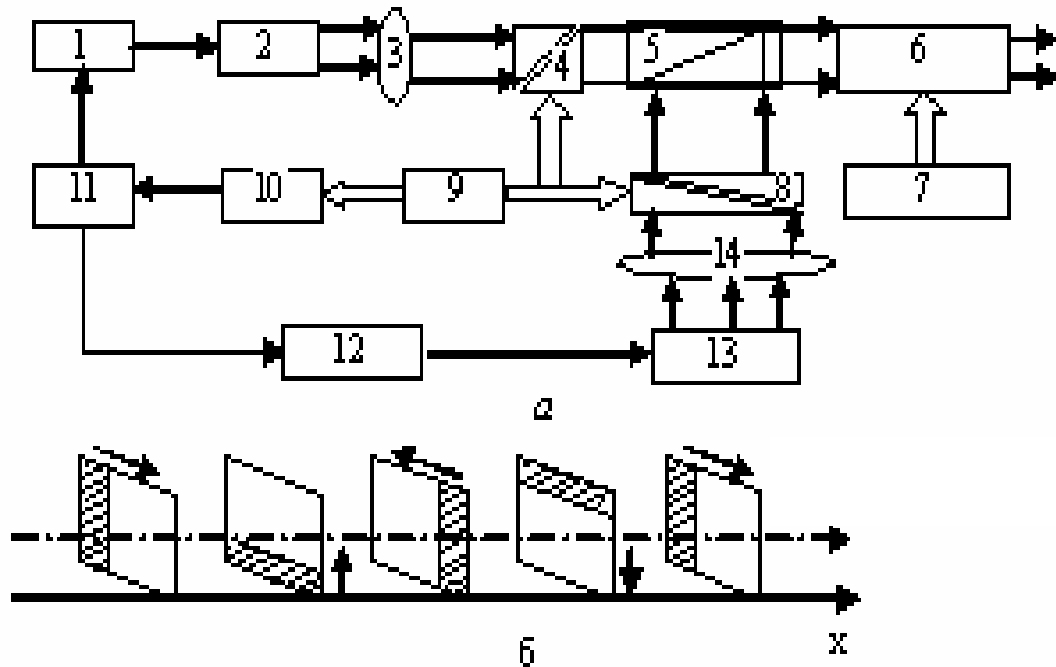


Рис. 1.10. Функціональна схема:

а) структурна схема; б) фази сканування інформаційного поля керування ракетою; 1,10 – модулятори; 2,9 – лазери; 3 – призма; 4 – коліматор; 5 – клини; 6,8 – приводи; 7 – датчик кута повороту; 11 – шифратор

В цій системі лазерне випромінювання (ЛВ) формується в коліматорі, а потім проходить через клини які регулюють горизонтальне та вертикальне відхилення лазерного пучка. Сформоване поле почергово сканується по осям x та y як показано на рис.1.10(б).

Для вирішення завдань придушення ПТРК з командними ЛПСН ракет можуть застосовуватися маскуючі аерозольні перешкоди оператору ПТРК, що створюються з об'єкта, що захищається, зі складу комплексу електронно-оптичного активного захисту від високоточної зброї. Однак комплекси, що входять до складу комплексів електронно-оптичного активного захисту від

високоточної зброї містять датчики лазерного опромінення. Датчики призначені для видачі команд для постановки аерозольних перешкод оператору ПТРК, [7]. Крім того, реалізований в ЛПСН принцип нейтралізації перешкод за рахунок розміщення ФПП на ракеті та орієнтації його поля зору у напрямку на пускову установку ПТРК, використання лазерної лінії зв'язку для передачі команд управління ракетою, а також застосування різних способів підвищення перешкодозахищеності ЛПСН (спектральної селекції, тимчасового стробування сигналів і т.д.) повністю виключає створення перешкод у каналі управління ПТРК [8].

1.2. Принцип дії і характеристики автоматичних систем

Одним із напрямків розробки таких ПТРК є створення автоматичних ЛПСН ракет з гіперзвуковими швидкостями польоту ($V > 1000$ м/с). Цей напрямок знаменує початок абсолютно нового етапу розвитку систем для боротьби з об'єктами бронетанкової техніки і характеризується істотним підвищенням бойових можливостей протитанкових комплексів. Ці комплекси встановлюють на вертольоти армійської авіації, об'єкти бронетанкової техніки, та літаки тактичної авіації [10].

Специфіка автоматичної ЛПСН полягає в тому, що ракета наводиться не в лазерному промені, а у просторовому растрі, утвореному скануючим лазерним променем, і команди наведення виробляються бортовими процесорами ракети на основі аналізу інформації, що містить дані про положення ракети в просторовому растрі. Для формування інформаційного поля (просторового растру) керування ракетою використовуються два лазери, що працюють на довжині хвилі $10,6$ мкм з частотою повторення імпульсів 25 кГц і здійснюють сканування простору у вигляді растру, подібного до телевізійного растру. Один лазер забезпечує попереднє наведення ракет в секторі $5 \times 5^\circ$ за азимутом і кутом місця, а інший - точне наведення ракети в секторі $1 \times 1^\circ$. Потужність кожного лазера становить 50 Вт [2-5].

Для сканування діаграмами спрямованості лазерів попереднього і точного наведення ракети використовується рядковий закон сканування

растрів з вертикальним розташуванням рядків. Час сканування кожного растру становить близько 0,1 с, розбіжність випромінювання лазерів на виході резонатора - 1,2 ... 1,6 мрад, а на виході формуючої оптики лазерів - 1,8 кут. хв., що дозволяє усунути зони, де потужність сигналу керування буде менше порогової чутливості бортового ФПП ракети, що становить величину порядку $\Phi_{\text{пор}} = 10^{-8} \dots 10^{-10} \text{ Вт / см}^2$ [7]. Структурна схема автоматичної ЛПСН ракети показана на рис. 1.11..

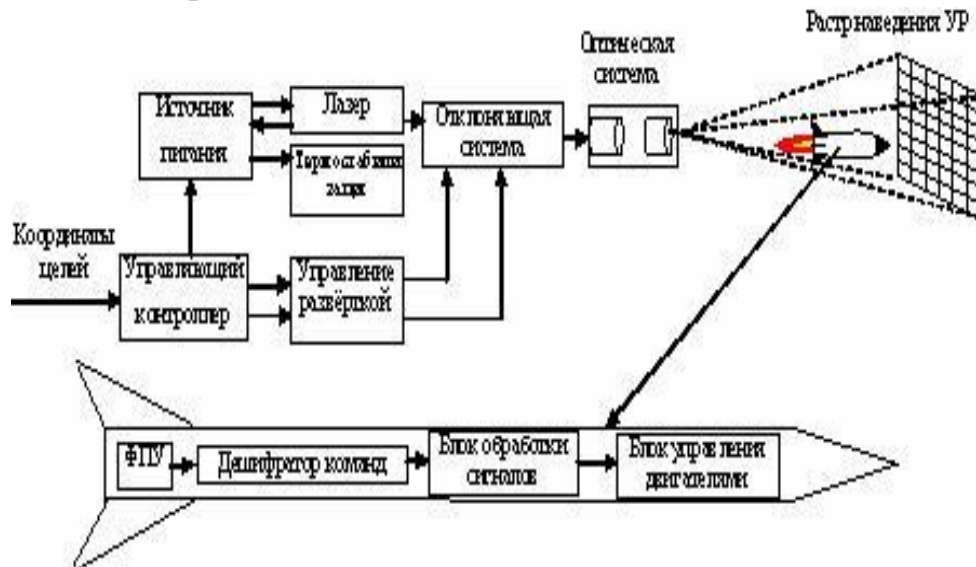


Рис. 1.11 Структурна схема автоматичної ЛПСН ракет

В автоматичних ЛПСН для керування відразу кількома ракетами при стрільбі по групі цілей використовується різновид командного способу наведення лазерного променя. Специфіка цього способу полягає в тому, що ракети при наведенні знаходяться не в лазерному промені, а в просторовому растрі, утвореному скануючим лазерним променем. Ракети після пуску спочатку наводяться в растрі попереднього наведення, тобто відбувається розведення ракет по призначеним їм растрам точного наведення. Час попереднього наведення не перевищує 0,3 ... 0,5 с [10]. Потім ракети наводяться в растрі точного наведення. У зв'язку з невисокою ймовірністю попадання однією ракетою в ціль на один об'єкт може одночасно наводитися до трьох ПТКР, забезпечуючи сумарну ймовірність його поразки трьома ракетами не нижче 0,9 на всіх дальностях стрільби $d_p = 1 \dots 5 \text{ км}$ [10]. Перед

пуском ракет проводиться синхронізація сканування лазерів попереднього та точного наведення та бортової апаратури ПТКР, що дозволяє розраховувати поточні координати ракет у межах раstra сканування, що має незмінні параметри (частоту кадрів, кількість рядків у кадрі тощо), та виробляти команди наведення ПТКР у будь-яку точку раstra. Положення раstra попереднього наведення задається за даними цілі вказування тепловізійної станції переднього огляду типу FLIR, що забезпечує попадання групової цілі (кілька об'єктів) у зону сканування лазера попереднього наведення. Для пояснення цього більш детальна структурна схема автоматичної ЛПСН зображена на рис. 1.12.

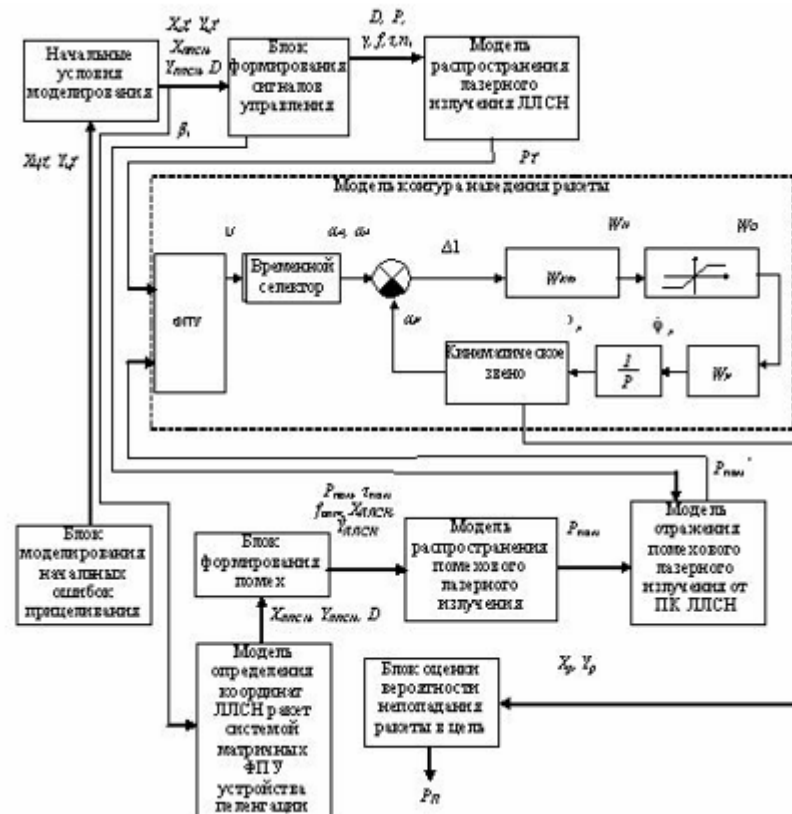


Рис. 1.12. Структурна схема математичної моделі автоматичної ЛПСН

Окремі об'єкти з складу групової цілі вибираються оператором ПТКР. Положення ракети в растрі точного наведення визначається за тимчасовим положенням при прийнятому ФПП лазерному імпульсу управління ПТКР щодо початку кожного кадру з точністю до одного елемента, кутові розміри

якого відповідають кутовим розмірам цілі на максимальній дальності стрільби ПТРК. Крім того, перед пуском ракет в пам'ять бортового процесору кожної ПТКР разом із сигналами загальної синхронізації вводять екстрапольовані на кінець наведення координати призначеної для обстрілу цілі в растрі попереднього наведення та координати початкової точки растру точного наведення за шкалою часу щодо сигналу синхронізації. Одночасно з розведенням ракет по растрам точного наведення проводиться періодична стрибкоподібна переорієнтація лазера точного наведення на вибрані цілі. Після того, як ракети стійко утримуються у цих растрах протягом двох-трьох керуючих імпульсів (0,3 ... 0,5 с), відбувається стробування сигналів лазера попереднього наведення, та подальше управління ПТКР, здійснюється лазером точного наведення. Для виключення зриву наведення ПТКР сигналами лазера точного наведення в процесі його стрибкоподібної переорієнтації з однієї цілі на іншу, та підвищення захисту від перешкод ЛПСН у ФПП кожної ракети здійснюється тимчасове стробування сигналів, тобто управління моментами відкриття та закриття ФПП, що відповідають моментам формування растрів точного наведення ракет [11]. До особливостей функціонування каналу виявлення та автосупроводження цілей на етапах ціле розподілу та наведення ракет є те, що наведення не припиняється навіть при зникненні однієї або кількох цілей за рахунок запам'ятовування їх координат до пуску ракет і прогнозування траєкторій руху цілей, у тому числі замаскованих.

Таким чином, поряд із загальними рисами, властивими одноцільовим лазерно-променевим системам командного наведення ПТКР (розміщенням ФПП на ракеті та орієнтацією його поля зору в напрямку на пускову установку ПТРК, використанням лазерної лінії передачі команд управління ракетою, застосуванням спектральної фільтрації сигналів за рахунок використання у ФПП вузькополосних фільтрів), характерними особливостями автоматичних ЛПСН багато цільових ПТРК є:

- часове стробування сигналів, що надходять на ФПП ракет, тобто управління моментами формування растрів точного наведення ПТКР, а також запам'ятовування координат призначених для обстрілу цілей у мікропроцесорах ракет перед їх пуском, що суттєво підвищує захист від перешкод ЛПСН і дозволяє забезпечити розведення ракет з різних цілей;

- визначення координат кожної з керованих ЛПСН ракет з відносно невисокою точністю (до розмірів одного елемента растра точного наведення, що відповідають розмірам цілі на максимальній дальності стрільби ПТКР), що викликає необхідність призначення до трьох ПТКР для ураження однієї цілі;

- запам'ятовування координат обстрілюваних цілей до пуску ракет, прогнозування траєкторій руху цілей, у тому числі замаскованих перед пуском або під час наведення ракет, що робить неефективним застосування перешкод системі авто супроводу цілей;

- використання в ПТКР інертної бойової частини, що не містить боєзаряду і вражає ціль за рахунок високої кінетичної енергії (ракети типу КЕМ (Kinetic Energy Missile), СКЕМ (Compact Kinetic Energy Missile) та НВМ (High Velocity Missile)), що вимагає точного влучення ракети в ціль;

- відсутність на ПТКР аеродинамічних поверхонь (приводів керування) та застосування імпульсного газодинамічного управління ракетами за командами ЛПСН, що дозволяє значно збільшити швидкості їхнього польоту аж до гіперзвукових і за рахунок цього значно обмежити час, протягом якого можливе створення перешкод ЛПСН.

Для вирішення завдань придушення ПТКР з автоматичними ЛПСН ракет можуть застосовуватися комплекси для групового захисту об'єктів [12], які здійснюють постановку протяжної маскуючої аерозольної завіси, що прикриває бойовий порядок підрозділу об'єктів. Проте необхідність швидкого (трохи більше 0,5 с) формування протяжної завіси (250 ... 300 м для захисту роти танків) через короткий час (4...5 с) наведення гіперзвукових ПТКР, можливість прострілу відразу кількох цілей (аж до танкової роти) роблять проблематичним використання мас аерозольної завіси, що управляє,

створюваної з борту комплексу групового захисту для придушення автоматичних ЛПСН ракет.

Для сканування діаграмами спрямованості лазерів попереднього і точного наведення ракети використовується закон сканування растрів з вертикальним розташуванням рядків. Приклади сканування зображені на рис. 1.14..

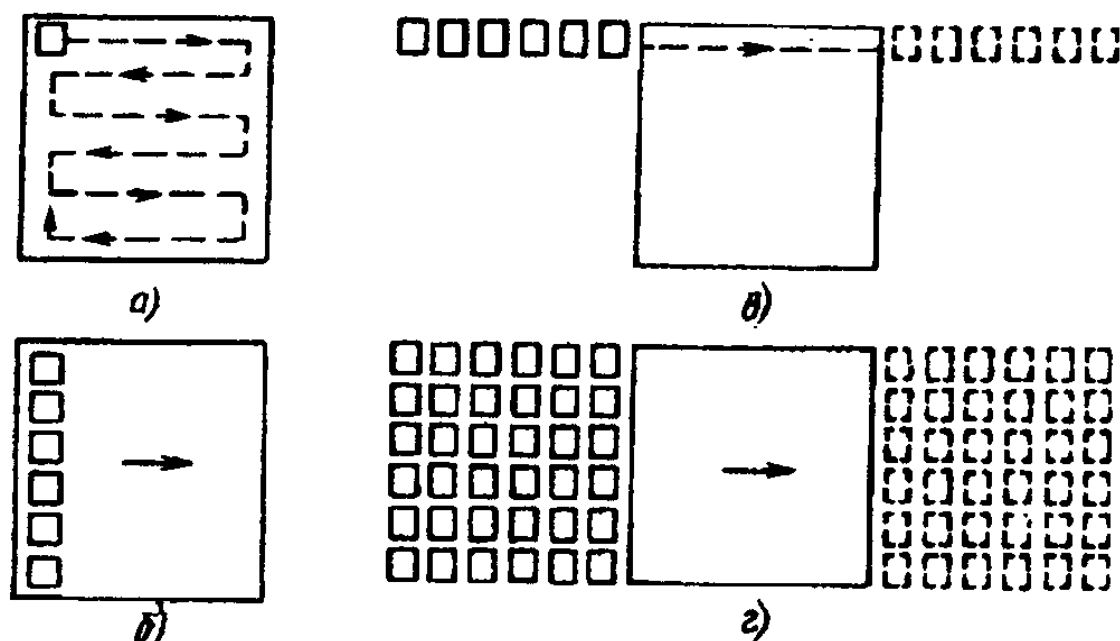


Рис. 1.14. Способи сканування:

а) - одноелементне; б) – паралельне; в) – послідовне; г) - комбіноване

Час сканування кожного растру складає близько 0,1 с, розбіжність випромінювання лазерів на виході резонатора - 1,2 ... 1,6 мрад, а на виході формуючої оптики лазерів - 1,8 кут. хв., що дозволяє усунути зони, де потужність сигналу управління буде менше порогової чутливості бортового ФПП ракети, що становить величину порядку $\Phi_{\text{пор}}=10^{-8} \dots 10^{-10}$ Вт/см² [7].

До особливостей побудови лазерно-променевих систем автоматичного наведення ракет можна віднести такі:

- розміщення ФПП на ракеті та орієнтація його поля зору у напрямку пускової установки;
- автоматичне одночасне наведення ракет на групу наземних цілей;
- гіперзвукова швидкість польоту ракет (малий час наведення);

- часове стробування сигналів керування ракетами;
- газодинамічне управління ракетами з обмеженою кількістю двигунів коригування траєкторії польоту;
- спектральна фільтрація сигналів управління ракетами.

1.3. Принцип дії і переваги системи керування лазерним променем з використанням акустооптичного дефлектора

Розглянуті вище варіанти систем керування лазерним променем мають як свої переваги так і недоліки. В дипломному проекті запропонована система керування орієнтацією лазерного променя в основі якої лежить використання акустооптичного дефлектора (АОД) [14]. Така система має певні переваги перед іншими, старішими системами. АОД мають такі переваги:

- висока роздільна здатність;
- низьке енергоспоживання
- проста конструкція
- малі габарити
- висока швидкодія

Аналогом запропонованої системи керування орієнтацією лазерного променя з використанням АОД є схема командної напіваавтоматичної ЛПСН зображена на рис. 1.15. В основі системи лежить використання двох пар оптичних клинів для відхилення лазерного променя по горизонталі та вертикалі.

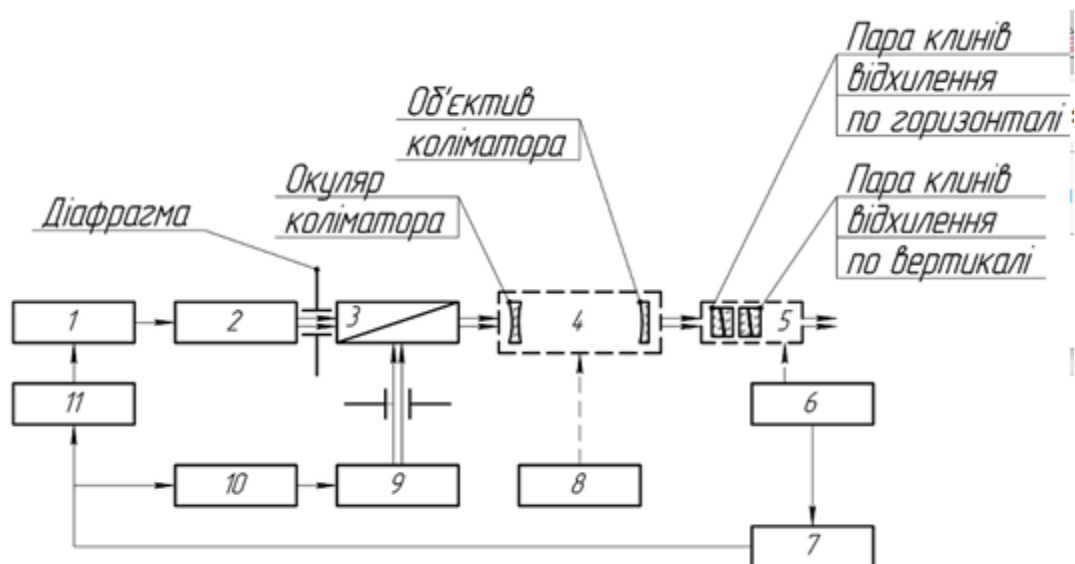


Рис. 1.15 Функціональна схема напівавтоматичної командної ЛПСН:

1,10 – модулятори; 2,9 – лазери; 3 – призма; 4 – коліматор; 5 – клини; 6,8 – приводи; 7 – датчик кута повороту; 11 – шифратор

Наведена на рис. 1.15. функціональна схема напівавтоматичної ЛПСН влаштована наступним чином. Оператор виявляє і розпізнає ціль, після підтвердження цілі відбувається пуск ракети. У момент пуску ракета «встрілюється» в лазерний промінь і телеорієнтується на його осі, яка збігається з лінією візування цілі, лазерний промінь відхиляється двома парами клинів в межах інформаційного поля і керує траєкторією руху ракети утримуючи її на лінії візування цілі. Завдяки такій системі керування ракета влучає в ціль.

Кожна з гілок пристрою забезпечує пошук цілі та керування ракетою по одній з осей координат. Наприклад, лазер 2 визначає координати ракети в горизонтальній площині, а лазер 9 - у вертикальній площині. Випромінювання лазерів формується діафрагмами дифракційної корекції. Механічний блок керування клинами отримує дані сигнали від фотоприймача, який розташований в хвостовій частині ракети, і, таким чином, визначає положення ракети в даний момент часу. Керування ракетою починається з того моменту, коли електронний блок керування пристрою отримує перші сигнали.

Інформація з електронного блока керування надходить на датчик кута повороту ракети 7, після якого шифратор 11 формує керуючі команди на модулятори лазерного випромінювання 1 і 10. Лазери виробляють певну послідовність кодованих оптичних імпульсів, що передаються через фотоприймач на борт ракети для керування рулями ракети з метою направлення ракети на ціль і враження цілі. Для оптичного поєднання гілок горизонтального і вертикального наведення ракети і направлення лазерних променів у вхідну зіницю панкратичної оптичної системи використовується призма Глана 3. Панкратична оптична система 4 з механічним приводом 8 поступово змінює кутове розходження лазерних променів на виході ЛПСН протягом польоту ракети від старту до влучення в ціль. На початковій ділянці траєкторії руху ракети кутове розходження лазерного променя повинно бути суттєво більшим, чим в кінцевій ділянці траєкторії. Завдяки цьому забезпечується надійне "встрілювання" ракети в лазерний промінь.

Одним з головних недоліків таких систем є мала швидкодія. Це пов'язано з використанням оптико-механічних клинів в якості елементів для відхилення лазерного променя. Оптичні клини мають складну конструкцію, та що більш важливо при використанні клинів в ЛПСН виникає необхідність використання мікродвигуна який буде керувати ними, що значно погіршує швидкодію ЛПСН в порівнянні з системами в основі яких лежить відхилення лазерного променя акустооптичними дефлекторами.

Запропонований в дипломному проекті метод керування лазерним променем для ЛПСН з використанням акустооптичного модулятора пояснює схема приведена на рис.1.16[15]

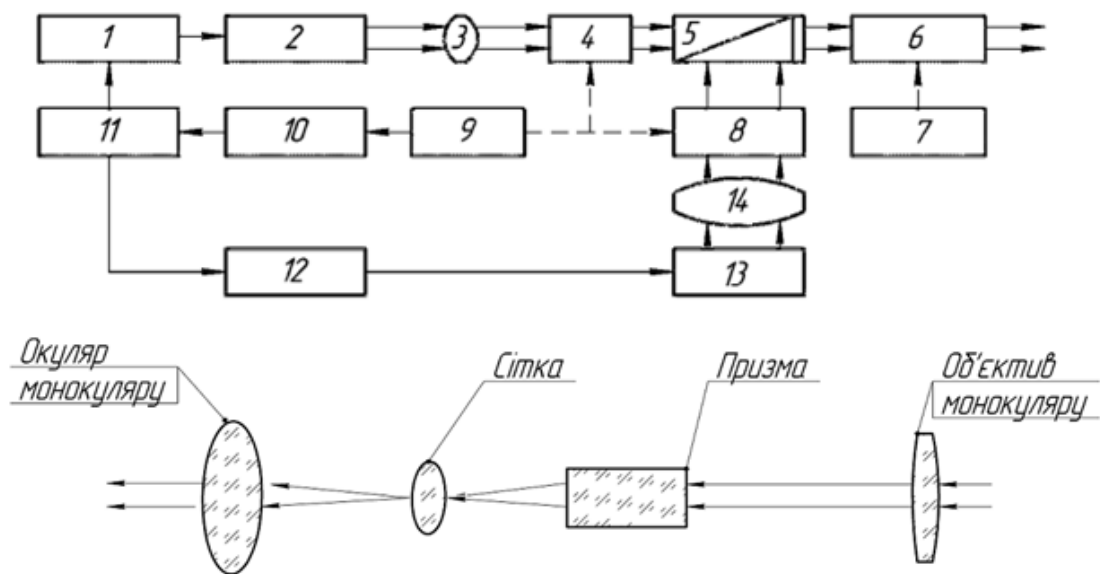


Рис. 1.16 схема роботи системи керування орієнтацією лазерним променем з використанням АОД:

1,12 – модулятори; 2,13 – лазери; 3,14 – об’єктиви; 4,8 – дефлектори; 5 – призма Глана; 6 – панкратична система; 7 – механічний привід для керування панкратичною системою; 9 – електронна система керування дефлекторами; 10 – датчик кута повороту; 11 – шифратор

Схема ЛПСН наведена на рис. 1.16 влаштована наступним чином. Оператор за допомогою оптико-візуального або тепловізійного прицілу виявляє і розпізнає ціль, а після пуску ракети утримує перехрестя прицілу (прицільну мітку) на цілі протягом всього часу польоту ракети. У момент пуску ракета "встрілюється" в лазерний промінь і телеорієнтується по його осі, що збігається з лінією візування цілі оператором. Лазерний промінь відхиляється акустооптичним дифракційним дефлектором в межах інформаційного поля і керує траєкторією руху ракети, утримуючи її на ЛВЦ. Завдяки такій системі керування ракета влучає в ціль. Кожна з гілок пристрою забезпечує пошук цілі та керування ракетою по одній з осей координат. Наприклад, лазер 2 визначає координати ракети в горизонтальній площині, а лазер 13 - у вертикальній площині. Випромінювання лазерів формується об’єктивами 3, 14. Електронний блок керування акустооптичними

дифракційними дефлекторами отримує дані сигнали від фотоприймача, який розташований в хвостовій частині ракети, і, таким чином, визначає положення ракети в даний момент часу. Керування ракетою починається з того моменту, коли електронний блок керування пристрою отримує перші сигнали. Інформація з електронного блока керування надходить на датчик кута повороту ракети 10, після якого шифратор 11 формує керуючі команди на модулятори лазерного випромінювання 1 і 12. Лазери виробляють певну послідовність кодованих оптичних імпульсів, що передаються через фотоприймач на борт ракети для керування рулями ракети з метою направлення ракети на ціль і враження цілі. Для оптичного поєднання гілок горизонтального і вертикального наведення ракети і направлення лазерних променів у вхідну зіницю панкратичної оптичної системи використовується призма Глана 5. Панкратична оптична система 6 з механічним приводом 7 поступово змінює кутове розходження лазерних променів на виході ЛПСН протягом польоту ракети від старту до влучення в ціль. На початковій ділянці траєкторії руху ракети кутове розходження лазерного променя повинно бути суттєво більшим, чим в кінцевій ділянці траєкторії. Завдяки цьому забезпечується надійне "встрілювання" ракети в лазерний промінь.

Використання АОД дозволяє спростити конструкцію, підвищити точність ПТРК, його надійність, та пришвидшити швидкодію, що є досить вагомим нюансом в умовах сучасних війн. Також корисним є те, що Дефлектори дозволяють здійснювати безперервне відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля та дискретне перемикання в разі необхідності відхилення лазерного променя лише по одній з осей координат.[15]

Висновки до першого розділу

1. Для враження бронетанкової техніки в сучасних умовах бойових дій найбільш ефективним засобом є використання напівавтоматичних та автоматичних лазерно променевих систем наведення ракет.
2. Прикладом вітчизняних розробок в цьому напрямку є комплекси враження броньованих та легко броньованих цілей «Корсар» і «Стугна-П».
3. Головним проблемним питанням при розробці цих комплексів є створення системи розгортки лазерного променя для керування ракетою, що вражає ціль.
4. Недоліком існуючих систем є: мала швидкодія та складність конструкторської і технологічної реалізації.
5. В дипломному проекті запропонована автоматизована система сканування лазерним променем з використанням акустооптичного дефлектора, яка дозволяє підвищити швидкодію, спростити конструкторську і технологічну реалізацію, покращити експлуатаційні характеристики ЛПСН.

РОЗДІЛ II

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТООПТИЧНИХ ДЕФЛЕКТОРІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ

2.1. Принцип дії акустооптичних дефлекторів

Акустооптичні дефлектори та сканери – пристрої для керування відхиленням світлового променя у просторі на основі акустооптичної дифракції чи рефракції. Принцип дії дифракційних дефлекторів ґрунтується на залежності кута дифракції від частоти пружної хвилі. При зміні частоти всі дифракційні максимуми, за винятком нульового, сканують кутом, причому кут сканування $\Delta\theta_d$ пропорційний діапазону зміни частоти звукових коливань Δf . Принцип дії АОД зображено на рис. 2.1..

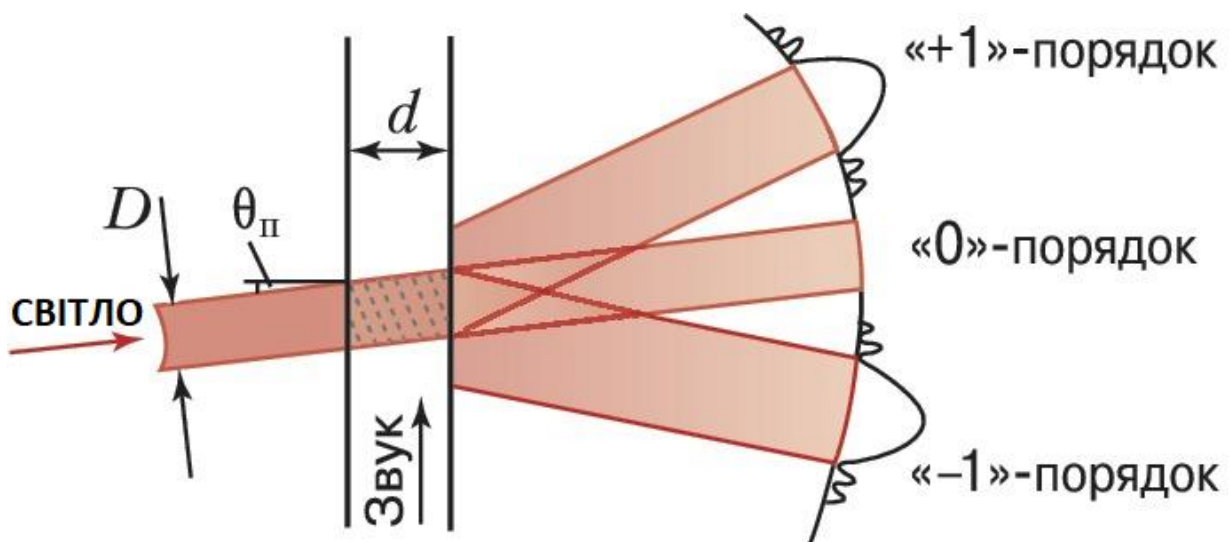


Рис. 2.1 Принцип дії акустооптичного дефлектору

Сканери служать для безперервної розгортки променя, дефлектори – для адресації променя в межах фіксованої кількості напрямків, у яких може відхилятися світловий промінь. У дифракційних АОД (найпоширеніші) кут відхилення світла θ змінюють шляхом зміни частоти звуку f .

Основні характеристики таких дефлекторів:

- кількість розв'язуваних станів світлового променя (у межах макс. кутового переміщення $\Delta\theta$)
- швидкодія τ , що визначається як час переходу з одного стану в інший;
- втрати пропускання світла $\alpha = P_{\text{вх}}/P_{\text{вих}}$ (в дБ), де $P_{\text{вх}}$, $P_{\text{вих}}$ – потужність відповідно падаючого та відхиленого променя;
- частота акустичних коливань;
- смуга частот акустооптичного дефлектора.

Також існують дифракційні АОД, що здійснюють двокоординатне відхилення світлового променя. У цьому випадку використовуються два схрещені одновимірні дефлектори, як правило, суміщені в одній акустооптичній комірці, в якій акустичні хвилі збуджуються у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Сучасні дефлектори дозволяють отримувати до 10^4 розв'язних станів з часом переходу близько 1-30 мкс і втратами пропускання в декілька десятків відсотків при споживаній електричній потужності близько 1 Вт.

Розглянемо дифракцію світла на акустичних хвилях в оптично прозорому середовищі, у якому збуджується акустична хвиля. Оптичний пучок падає на комірку та проходить через акустичний пучок. Завдяки пружно оптичному ефекту біжуча акустична хвиля, створює просторову модуляцію показника заломлення, яка за відповідних умов буде заломлювати падаючий промінь в одному або декількох напрямках. Акустооптичну взаємодію можна розглядати як параметричний процес, при якому падаюча оптична хвиля, змішується з акустичною хвилею, утворюючи ряд поляризаційних хвиль. Хвилі поляризації, в свою чергу, генерують нові оптичні хвилі різних порядків дифракції як показано на рис. 2.2..

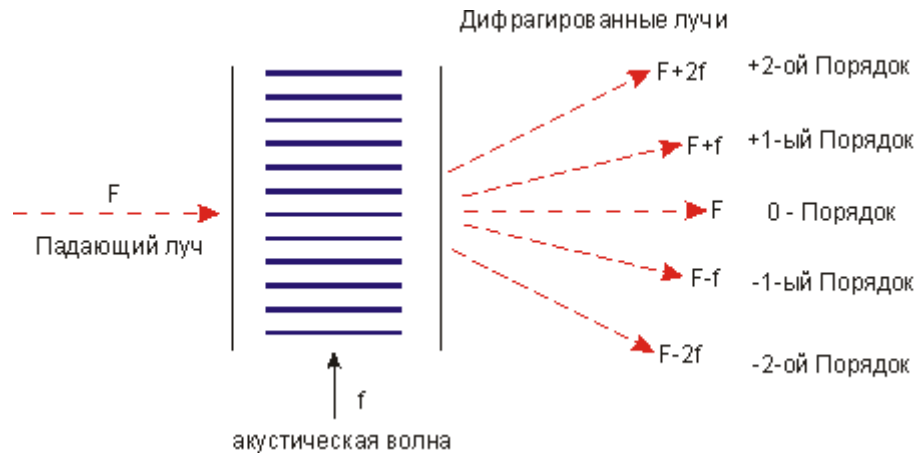


Рис. 2.2. Генерація різних порядків дифракції оптичною хвилею

Але найцікавіший особливий випадок - це дифракція Брегга. При дифракції Брегга використовується тільки перший дифракційний порядок, кут відхилення якого у два рази перевищує кут падіння Брегга (рис. 2.3).

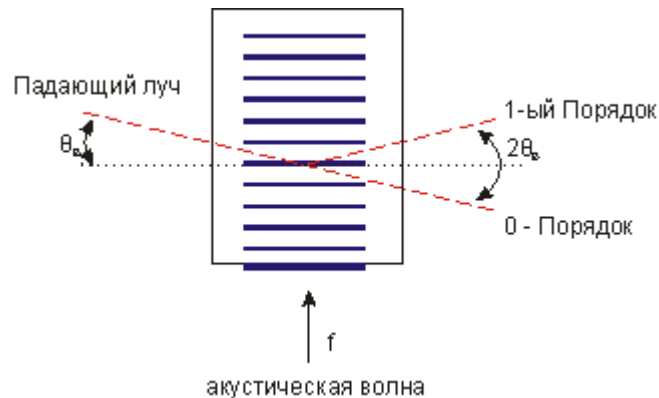


Рис. 2.3 Дифракція Брегга

На рис. 2.4 наведена схема дифракційного хвильового вектора Брегга в оптично анізотропному середовищі, такому як двопроменезаломлюючий кристал парателлуріта (TeO_2).

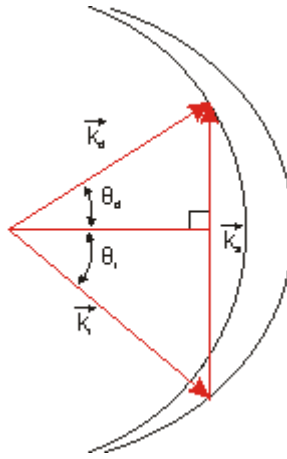


Рис. 2.4. Діаграма хвильового вектору дифракції Брегга

Значна дифракція світла виникає тільки при дотриманні точної координації векторів.

$$K_d = k_i + k_a \quad (2.1)$$

В цілому акустооптичні взаємодії в анізотропному середовищі визначаються величиною хвильових векторів виразом:

$$k_i = \frac{2\pi n_i}{\lambda_0}; k_d = \frac{2\pi n_d}{\lambda_0}; k_a = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.2)$$

де $\Lambda = V/f$ - довжина акустичної хвилі, V і f - швидкість і частота акустичної хвилі.

У загальному випадку показники заломлення падаючого та дифрагованого світлових променів різні. Як приклад розглянемо бреггівську дифракцію в позитивному одноосному кристалі. З діаграми хвильового вектора, показаної на рисунку вище, і з використанням закону косінусів можна отримати:

$$\sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2n_i\Lambda} \left[1 + \frac{\Lambda^2}{\lambda_0^2} (n_i^2 - n_d^2) \right] \quad (2.3)$$

$$\sin \theta_d = \frac{\lambda_0}{2n_d\Lambda} \left[1 + \frac{\Lambda^2}{\lambda_0^2} (n_i^2 - n_d^2) \right] \quad (2.4)$$

Одним з основних параметрів дефлектору є ефективність дифракції, що визначається виразом:

$$\eta = \frac{\pi^2}{2\lambda_0^2} \left(\frac{n^6 p^2}{2} \right) S^2 L^2 = \frac{\pi^2}{2\lambda_0^2} M_2 P_a \left(\frac{L}{H} \right) \quad (2.5)$$

При цьому :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho V^3 S^2 L H \quad (2.6)$$

де P_a - акустична потужність, H - висота акустичного променя, ρ - щільність маси, V - швидкість акустичної хвилі, а $M_2 = n^6 p^2 / p V^3$ – добротність матеріалу.

Таким чином, дифракційна ефективність лінійно пропорційна акустичній потужності. Кристал TeO_2 має надзвичайно високу акустооптичну ефективність ($M_2 = 793 \times 10^{-18} \text{ с}^3 / \text{г}$ і вище при заданій геометрії взаємодії), що дозволяє використовувати парателлурит для малої акустичної потужності без зниження дифракційної ефективності в порівнянні з іншими матеріалами.

У міру збільшення акустичної потужності ефективність дифракції досягає насичення та наближається до 100 відсотків. Таким чином, в режимі Брегга можна досягти повного збіднення падаючого світла. Ці особливості дають можливість ефективно проектувати всі типи акустооптичних пристроїв з технічними характеристиками, що дозволяють, зокрема, відмовитися від потужних систем охолодження, а також створювати ряд унікальних пристроїв, наприклад акустооптичний пристрій фокусування з високою апертурою для обробки зображень багатоканальних пристроїв.

Акустооптична взаємодія приводить до відхилення оптичного променя на певний кут $\Delta\theta_d$ пропорційний частоті акустичної хвилі. Ефективність акустооптичного дефлектора значно зростає при правильному виборі розмірів акустичної і світлової хвиль. Максимальний кут відхилення лазерного променя визначається співвідношенням

$$\Delta\theta_d = (p\lambda / nv)f, \quad (2.7)$$

де $\Delta\theta_d$ – кут відхилення лазерного променя; p – номер дифракційного максимуму; λ – довжина хвилі лазерного випромінювання; n – показник заломлення скла дефлектора; v – швидкість звука; f – частота акустичної хвилі.

Найбільше відхилення лазерного променя спостерігається для першого порядку дифракційного максимуму, тому в подальшому приймемо $p = 1$.

Однією з найважливіших характеристик будь-якого пристрою, що відхиляє, є число розв'язуваних максимумів, або роздільна здатність світлового пучка N . Для одновимірного дефлектора N дорівнює:

$$N = \Delta\theta_d / \varphi_d, \quad (2.8)$$

де φ_d – кутова ширина світлового пучка на виході з дефлектора.

Якщо кут обумовлений дифракційними ефектами то φ_d дорівнює:

$$\varphi_d = \mu\lambda / nd, \quad (2.9)$$

де μ – коефіцієнт, що залежить від структури пучка та обраного критерію роздільної здатності; d – діаметр лазерного променя.

Зазвичай використовується критерій Релея, згідно з яким дві сусідні світлові плями вважаються роздільними, якщо максимум інтенсивності світла в одній збігається з першим нулем інтенсивності в іншій. Для однорідного пучка прямокутного перерізу $\mu = 1$, для однорідного пучка круглого перерізу $\mu = 1,22$, для гауссового пучка, обмеженого на рівні e^{-2} за інтенсивністю $\mu = 1,34$.

Враховуючи (2.7), (2.8), (2.9), також що $\tau = d/v$ роздільна здатність дорівнює:

$$N = \frac{\Delta\theta}{\theta_d} = \frac{\lambda f n d}{\mu n v \lambda} = \tau f \quad (2.10)$$

Отже, роздільна здатність N дорівнює добутку часу проходження акустичної хвилі через апертуру оптичного променя τ на частоту акустичної хвилі.

Смуга частот акустооптичного дефлектора залежить від швидкостей розповсюдження ультразвукових хвиль:

$$\Delta f = 1.8 n v^2 / \lambda f L \quad (2.11)$$

2.2. Характеристики матеріалів які використовуються для виготовлення акустооптичних дефлекторів

2.2.1 Акустооптичні дефлектори на основі халькогенідних стекел

Акустооптичний дефлектор, виконаний на основі халькогенідного скла складу $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$ для сканування світлового променя в смузі частот $\Delta f = 17,7$ МГц, потребує $\sim 0,1$ Вт управляючої потужності. Для досягнення ще менших величин ультразвукової управляючої потужності, доцільніше застосування склоподібних сплавів Hg-As-S, оскільки такі стекла характеризуються більш високими значеннями критерію акустооптичної якості. Якщо врахувати втрати при перетворенні електричного сигналу в акустичну

хвилю, то реальні значення управляючої потужності для дефлекторів на основі халькогенідних стекол $(\text{As}_2\text{S}_3)_{1-x}\text{Hg}(\text{Ge})_x$ складають 1-2 Вт (див. табл. 2.1).

Величину керуючої акустичної потужності можливо дещо зменшити, якщо узгодити акустичні імпеданси звукопроводу, п'єзоперетворювача та шару акустичної зв'язки. Вплив зв'язуючого шару на частотну характеристику дефлектора можна мінімізувати, знижуючи його товщину і вибираючи для цієї мети речовини з приблизно однаковим акустичним імпедансом [16]. На низьких частотах (до 100 МГц) достатньо ефективно працює клейове з'єднання. Як зв'язуючий шар використовується епоксидна смола з різними наповнювачами – дрібнодисперсний порошок ZnO , алюмінієва пудра. В деяких випадках для забезпечення необхідного узгодження із звуководом застосовувалася індієва (~ 10 мкм) фольга.

Проведені експерименти показали, що для стекол $(\text{As}_2\text{S}_3)_{1-x}\text{Hg}(\text{Ge})_x$ достатньо ефективно працює зв'язка, що складається з ЕДП-09 (наповнювачем ZnO). Необхідно відзначити, що приведений склад акустичної зв'язки не є найбільш вдалим, але через відсутність вакуумної технології не представлялося можливим застосувати інші, більш ефективні способи з'єднання [16]. Звичайно акустооптична комірка – це п'єзоперетворювач, який акустично з'єднаний з світлозвукководом. В розроблених акустооптичних перетворювачах п'єзоперетворювач виготовлявся із монокристалічного ніобіту літія $\text{Y}+360$ зрізу.

Параметри акустооптичних дефлекторів на основі халькогенідних стекол

Матеріал звукопроводу	f_0 , MHz	Δf , MHz	τ , мкс	N	$P_{ак}$, мВт	$M_1, 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$	$M_3, 10^{-11} \text{ м} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$
1. $\text{Ge}_{0.20}\text{As}_{39.92}\text{S}_{59.88}$	70	29.9	7.52	224	64	724	272
2. $\text{Ge}_{0.4}\text{As}_{39.84}\text{S}_{59.75}$	70	30.0	7.52	226	65	705	265
3. $\text{Ge}_{0.61}\text{As}_{39.75}\text{S}_{59.63}$	70	30.0	7.52	226	66	705	264
4. $\text{Ge}_{0.83}\text{As}_{39.67}\text{S}_{59.50}$	70	30.0	7.51	226	81	579	217
5. $\text{Ge}_{1.04}\text{As}_{40.26}\text{S}_{58.70}$	70	30.2	7.46	225	91	512	191
6. $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$	70	30.3	7.44	225	93	511	190
7. $\text{Ge}_{4.76}\text{As}_{38.10}\text{S}_{57.14}$	70	30.8	7.31	225	102	470	172

Фізичні властивості, які характеризують дану орієнтацію забезпечують найбільш ефективне збудження поздовжньої акустичної хвилі і мають наступні параметри :

- максимальний коефіцієнт електромеханічного зв'язку для цієї моди коливань $k_L=0.52$;
- максимальна швидкість поширення звукової хвилі $V_L=7320\text{м/с}$;
- акустичний імпеданс $\rho V_L=34.5 \cdot 10^6 \text{ Нс/м}^3$ (акустичний імпеданс матеріалу світлозвукпроводу $\rho V_L=8,6 \cdot 10^6 \text{ Нс/м}^3$).

2.2.2 Акустооптичні дефлектори на основі анізотропних матеріалів

Можливість практичного використання анізотропної дифракції в акустооптичному дефлекторі пов'язана з появою оптично досконалих кристалів парателлуриту. Парателлурит (хімічна формула TeO_2) - тетрагональний кристал

класу (422), що володіє оптичною активністю. Вздовж його оптичної осі право та ліво циркулярно-поляризовані світлові хвилі поширюються з різними швидкостями, причому відповідна різниця коефіцієнтів заломлення складає всього $4,5 \cdot 10^{-3}$.

Парателлурит має рідкісне поєднання властивостей, які зробили цей матеріал одним з найперспективніших в акустооптиці. Так, зсувна звукова хвиля, що розповсюджується вздовж осі [110], має дуже невелику швидкість - всього $0,61 \cdot 10^5$ см/с, що дозволяє при тих же апертурах світлового променя отримувати більшу в порівнянні з іншими матеріалами роздільну здатність.

Коефіцієнт акустооптичної якості при дифракції світла на цій хвилі по відношенню до плавленого кварцу становить 510. Керуюча потужність в дефлекторах на TeO_2 відносно невелика навіть при $L/H < 1$, що дозволяє використовувати світлові промені з круглим перетином і обходитися без складної формуючої оптики з циліндричними лінзами. Наразі існують кристали парателлуриту розміром до кількох сантиметрів.

Векторна діаграма дифракції дефлектора з використанням кристалу парателлуриту зображена на рис. 2.5.. Звукова хвиля в кристалі розповсюджується вздовж осі, випромінювання - під невеликим кутом до осі. Центральна частота діапазону, яка залежить від довжини світлової хвилі, визначається виразом (2.12).

$$f_0 = v / \lambda \sqrt{|n^2 - n_1^2|} \quad (2.12)$$

Наприклад, при $\lambda=0,63$ мкм $f_0=42$ МГц, при $\lambda=0,44$ мкм $f_0=85$ МГц.

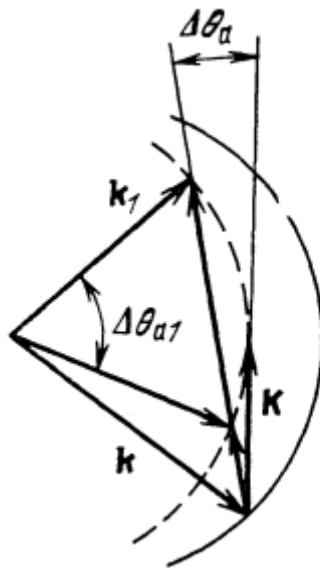


Рис. 2.5. Векторна діаграма анізотропної дифракції світла в парателлуриті

В ізотропних дефлекторах для досягнення необхідного частотного діапазону доводиться жертвувати ефективністю, щоб забезпечити велику розбіжність звукової хвилі. При цьому виникає дифракція світла у вищі порядки. У дефлекторі на парателлуриті, завдяки слабкій залежності кута падіння променю від частоти, для досягнення необхідної розбіжності звуку не потрібно зменшувати п'єзоперетворювач. У частотному діапазоні від 60 до 120 МГц в парателлуриті розбіжність звуку повинна становити $0,15^\circ$, для ізотропного дефлектора ця ж величина дорівнює $1,2^\circ$.

Це означає, що довжина п'єзоперетворювача L ізотропного дефлектора у вісім разів менша, ніж анізотропного. Відповідно має зрости і керуюча потужність, що вкрай небажано через термічні ефекти, що виникають при великих рівнях перекачки.

Все ж таки перевага анізотропної дифракції в описаній геометрії проявляється не повністю, і дефлектор має такі недоліки: занадто низька центральна частота не дозволяє отримувати частотний діапазон сканування з таким поширеним джерелом випромінювання, як лазер на суміші He-Ne; у центрі частотної характеристики розташований глибокий провал, пов'язаний із двофоновим процесом.

2.2.3 Інші перспективні матеріали для виготовлення акустооптичних дефлекторів

В даний час перелік матеріалів, що можуть бути використані для виготовлення АОД перевищує сто найменувань. Але не дивлячись на це переважна більшість практично всі дослідження виконують чи було виконано з оглядом на одні і ті ж самі основні матеріали. Для промислового виготовлення перелік матеріалів ще менший. Таким чином більшість фірм в промислових АОД віддають перевагу менш екзотичним матеріалам таким як стекла.

Причина полягає в тому, що зазвичай від матеріалів вимагають такі характеристики:

- значення коефіцієнта акустооптичної якості M_2 ;
- мале акустичне згасання;
- швидкість поширення звуку в матеріалі.

Меншу увагу приділяють оптичній якості, технологічності.

Для промислових приладів безумовно важливим є те чи освоєний матеріал виробництвом. Таким чином, дійсно перспективними можуть виявитися матеріали, які у порівнянні з основних акустооптичних параметрів (коефіцієнт акустооптичної якості, згасання звуку) знаходяться на одному з останніх місць. Тому варто також приділити увагу акустооптичним матеріалам які підпадають під ці критерії. Це плавлений кварц SiO_2 молібдат свинцю PbMoO_4 , германій Ge, та скло(тяжкий флінт). Параметри цих матеріалів, а також параметри парателлуриту, наведені в табл. 2.2..

Параметри технологічних акустооптичних матеріалів

Матеріал	Діапазон прозорості, мкм	λ , мкм	Показатель преломления	Поляризация (или $\perp$ волновому вектору акустической волны) и направление распространения света	Поляризация и направление распространения акустической волны	Коэффициент качества по отношению к плавленому кварцу	Скорость акустической волны, 10^3 см/с	Коэффициент затухания, дБ/см·ГГц ²	Плотность, г/см ³	Примечание
SiO ₂ (плавленый кварц)	0,2—4,5	0,63	1,457	$\perp$, произвольная	продольная, поперечная	1 0,3	5,96 3,76	12 19	2,20	абсолютное значение $M_2=1,56 \times 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$
PbMoO ₄ (молибдат свинца)	0,42—5,5	0,63	2,385 2,262	$\perp$, $\parallel$	продольная по оси [001]	23 23	3,63	15	6,95	—
ТФ-7 (тяжелый флинт)	0,4—2,6	0,63	1,728	$\perp$	продольная	3,2	3,63	300	4,59	—
TeO ₂ (парателлурит)	0,35—5	0,63	2,26	круговая по оси [001]	поперечная по оси [110]	510	0,616	290	6,00	обладает оптической активностью
Ge (германий)	2—16	10,6	2,412	$\perp$, $\parallel$	продольная по оси [001]	22 16,5	4,20	15	5,33	
			4,0	$\parallel$, произвольная	продольная по оси [111], поперечная по оси [100]	540 185	5,50 3,51	30 9		

Враховуючи можливість використання описаних матеріалів варто розглянути кожен з них детальніше.

Плавлений кварц. Коефіцієнт якості $M_2=1,56 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$. Плавлений кварц є матеріалом, відносно якого визначають акустооптичну якість інших матеріалів. Значення M_2 будь-якого матеріалу виражають відносно величини M_2 матеріалу SiO₂ яку приймають рівною одиниці. Плавлений кварц має малий коефіцієнт згасання звуку, низькі оптичні втрати та високу оптичну якість.

Молибдат свинцю. Один з найбільш поширених акустооптичних матеріалів видимого та ближнього ІЧ діапазонів. Має високий коефіцієнт якості $M_2=23$ і мале акустичне згасання. Широко використовується в модуляторах і дефлекторах. Зразки з високою оптичною якістю можуть мати розміри до кількох сантиметрів, що зумовлює його застосування в дефлекторах з великою роздільною здатністю.

Важкі флінти. Невисокий коефіцієнт якості ($M_2=3-10$) і велике акустичне згасання (3-10 дБ на 1 см при 100 МГц) компенсуються гарними оптичними властивостями та технологічністю. Застосовуються в модуляторах видимого діапазону на частотах до 100 МГц.

Германій. Найпоширеніший акустооптичний матеріал у далекому та ближньому ІЧ діапазоні. Коефіцієнт якості $M_2=540$ при порівняно невеликому коефіцієнті згасання. Має високу теплопровідність, технологічний, широко застосовується в акустооптичних пристроях ІЧ діапазону.

Розглянувши матеріали які широко використовуються в акустооптиці варто також звернути увагу на менш популярні при виготовленні акустооптичні матеріали які наразі активно вивчаються в роботах по акустооптиці. В табл. 2.3 наведено параметри акустооптичних матеріалів які не використовуються в серійному виготовленні АОД. Розробка АОД на основі нових акустооптичних матеріалів дуже важлива для покращення параметрів пристроїв. У видимому діапазоні, як видно з наведених таблиць, є досить широкий набір матеріалів. Набагато гірша ситуація з акустооптичними метеріалами та приладами які працюють на довжині хвилі 10,6мкм, де використовують лише один матеріал — германій. Оскільки ефективність дифракції обернено пропорційна квадрату довжини хвилі випромінювання, для досягнення задовільних параметрів приладів потрібен матеріал з набагато більш високим коефіцієнтом акустооптичної якості, що зберігає інші позитивні властивості германію.

Параметри акустооптичних матеріалів, що зараз досліджуються

Матеріал	Діапазон прозорості, мкм	Показатель преломлення ($n_0 = 0,63$ мкм)	Поляризація (или $\perp$ волновому вектору акустической волны) и направление распространения света	Поляризація и направление распространения акустической волны	Коеффіцієнт M_2 по отношению к плавленому кварцу	Скорость акустической волны, 10^3 см/с	Коеффіцієнт затухання, дБ/см·ГГц ²	Плотность, г/см ³
α -HfO ₃	0,3—1,8	1,986	[100]	продольная по оси [001]	55	2,44	10	5,0
LiNbO ₃	0,4—4,5	2,20		продольная по оси [100],	4,5	6,57	0,15	4,64
		2,29	$\perp$	сдвиговая по оси [001]	1,87	3,59	2,6	
GaP	0,6—10	3,31	$\perp$, произвольная	продольная по оси [110],	28,5	6,32	6	4,13
				сдвиговая по оси [100]	15,1	4,13		
Al ₂ O ₃	0,15—6,5	1,766		продольная по оси [100]	0,23	11	0,2	4,0
As ₂ S ₃	0,6—11	2,61		продольная	273	2,25	280	3,2
Ag ₃ AsS ₃	0,6—13,5	2,98	$\perp$	продольная по оси [001]	250	2,65	800	5,57
SiO ₂ (кварц кристаллический)	0,12—4,5	1,544 $\lambda_0=0,589$ 1,553 $\lambda_0=0,589$	$\perp$ [001]	продольная по оси [001], продольная по оси [100]	0,95 1,52	6,32 5,72	2,1 3	2,65

2.3. Визначення параметрів акустооптичних дефлекторів

Для визначення основних характеристик акустооптичного дефлектора для ЛПСН потрібно скористатись значенням кута поля зору оптичної системи, який відповідає кутовому розміру інформаційного поля ЛПСН. У межах цього кута має відбуватись відхилення лазерного променя системи керування ракетою. Типове значення кута поля зору оптичної системи наведення для ЛПСН складає $\Delta\theta = 4^\circ = 0,06$ рад [18].

Для розрахунку в якості матеріала для АОД використаємо халькогенідне скло $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$ з параметрами:

- швидкість розповсюдження акустичної хвилі $v = 2686 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$;
- коефіцієнт акустооптичної якості $M_2 = 270 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$;
- середня довжина хвилі спектрального пропускання $\lambda = 0,905 \text{ мкм}$;
- показник заломлення $n = 2,3$;
- $p = 1$.

Скориставшись цими параметрами і співвідношенням (2.7) можна розрахувати частоту оптичних коливань за формулою:

$$f = \Delta\theta_d / (p\lambda/nv) \quad (2.13)$$

де $\Delta\theta_d$ – кут відхилення лазерного променя; p – номер дифракційного максимуму; λ – довжина хвилі лазерного випромінювання; n – показник заломлення скла дефлектора; v – швидкість звука; f – частота акустичної хвилі.

Найбільше відхилення лазерного променя спостерігається для першого порядку дифракційного максимуму, тому в подальшому прийmemo $p = 1$.

Частота коливань $f=409,6\text{МГц}$

Як видно з рис. 1.б) (див. розділ 1) для ЛПСН формується лазерний пучок прямокутного перерізу, тому прийmemo $\mu = 1$ і тоді (2.9) прийме значення:

$$\varphi_d = \lambda / nd . \quad (2.14)$$

Графіки залежності роздільної здатності дефлектора N від довжини ультразвукової хвилі (або частоти) при довільно вибраному діаметрі світлового променя d приведені на рис. 2.6.

З графіків наведених на рис. 2.6 видно, що роздільна здатність зменшується при збільшенні довжини ультразвукової хвилі і збільшується при збільшенні діаметру лазерного променя, який має бути узгоджений з розмірами дефлектора.

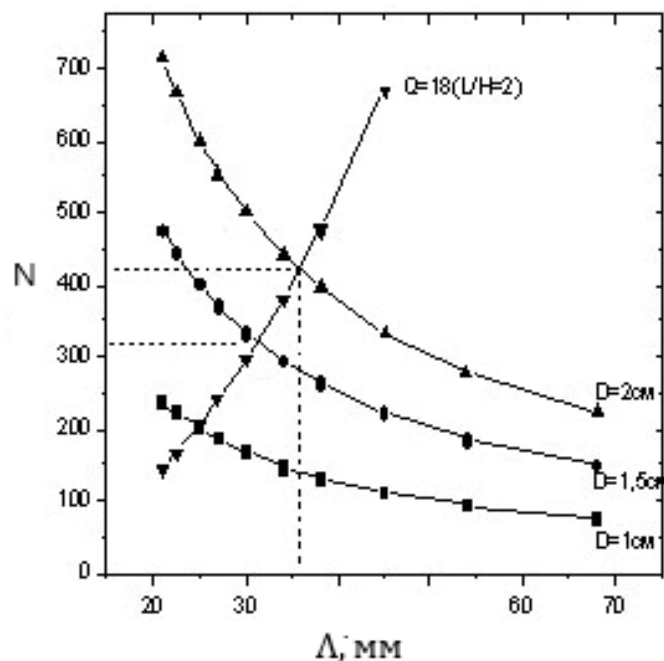


Рис.2.6 Залежність роздільної здатності дефлектора на халькогенідному склі $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$ від довжини ультразвукової хвилі.

Як слідує з рис. 2.6 при діаметрі лазерного променя $d = 2\text{ см}$ і довжині ультразвукової хвилі 36 мкм , роздільна здатність або число вирішуваних світлоелементів в межах вихідної апертури дефлектора, складатиме 420.

Важливою характеристикою дефлектора для ЛПСН є його швидкодія, яка

визначає час проходження пружної хвилі через апертуру світлового пучка.

Скориставшись співвідношенням (2.10), при роздільній здатності $N = 420$ і $f = 409,6 \text{ МГц}$ можемо розрахувати τ за формулою:

$$\tau = N/f \quad (2.15)$$

Підставивши вихідні данні, отримаємо: $\tau = 1.025 * 10^{-6} \text{ сек.}$

Для визначення смуги частот акустооптичного дефлектора Δf можна скористатися типовими значеннями лінійних розмірів збуджувача акустичних коливань, що дорівнюють : $L=5 \text{ мм}$; $H=4 \text{ мм}$.

Для визначення смуги частот Δf скористаємося формулою (2.11):

$$\Delta f = \frac{1,8nv^2}{\lambda f L}.$$

Підставивши вихідні данні, отримаємо: $\Delta f = 16,11 \text{ МГц.}$

Максимальне відхилення лазерного променя буде спостерігатись при його падінні на бічну поверхню дефлектора під кутом Бреґґа. Для реалізації ЛПСН використаємо напівпровідниковий імпульсний лазер L 11854-307-0,5, що виробляє фірма Hamamatsu. Лазер генерує випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 0,905 \text{ мкм}$. Враховуючи, що $\Lambda = v/f = 6,56 \text{ мкм}$ і скориставшись

$$\theta_{\text{Бр}} = \arcsin \frac{\lambda}{\Lambda}, \text{ отримаємо } \theta_{\text{Бр}} = 8^\circ.$$

. Висновки до другого розділу

1. Основні характеристики акустооптичних дефлекторів, які треба визначати при розробці автоматизованих ЛПСН такі:
 - максимальний кут відхилення лазерного променя;
 - роздільна здатність;
 - швидкодія;
 - втрати пропускання світла;
 - частота акустичних коливань;
 - смуга частот акустооптичного дефлектора.
2. Найбільш технологічними матеріалами для виготовлення акустооптичних дефлекторів є халькогенідні стекла типу $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$.

3. Для збільшення кута відхилення лазерного променя варто використати анізотропні матеріали, наприклад парателлурит, який має надзвичайно високу акустооптичну ефективність ($M_2 = 793 \times 10^{-18} \text{ с}^3 / \text{г}$ і вище при заданій геометрії взаємодії). Це дозволяє використовувати парателлурит для малої акустичної потужності без зниження дифракційної ефективності в порівнянні з іншими матеріалами.
4. Проведені теоретичні дослідження дозволили визначити основні характеристики акустооптичного дефлектора. Для відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля з кутом $\Delta\theta_d = 4^\circ = 0,06 \text{ рад}$ і визначених фізичних характеристиках халькогенідного скла необхідно забезпечити частоту коливань акустичної хвилі $f = 409,6 \text{ МГц}$. При роздільній здатності дефлектора $N = 420$ і частоті коливань $f = 409,6 \text{ МГц}$ швидкодія дефлектора складатиме $\tau = 1,025 \times 10^{-6} \text{ с}$. Роздільна здатність дефлектора зменшується при збільшенні довжини ультразвукової хвилі і збільшується при збільшенні діаметру лазерного променя, який має бути узгоджений з розмірами дефлектора.

РОЗДІЛ III

Розширення кутового діапазону і особливості проектування акустооптичного дефлектора для ЛПСН

3.1. Розширення кутового діапазону акустооптичного дефлектора

Для вирішення питання розширення кутового діапазону акустооптичного дефлектора розглянемо розрахунок геометрії акустооптичної взаємодії у кристалі парателлуриту[19].

Показники заломлення для звичайної, n_o і незвичайної n_e хвиль в парателлуриті як функція довжини хвилі випромінювання описуються емпіричними залежностями:

$$n_o^2 = 1 + \frac{2.5844\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.01801} + \frac{1.1557\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.06959} \quad (3.1)$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{2.8525\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.01801} + \frac{1.5141\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0.06922} \quad , \quad (3.2)$$

де λ_0 – довжина хвилі в вакуумі.

Показник заломлення падаючої хвилі, що має особливу поляризацію, визначається виразом:

$$n_i = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_i + n_e^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (3.3)$$

де θ_i – кут падіння хвилі на кристал.

На рис. 3.1. представлений графік залежності частоти коливань $f(\theta_i)$, побудований за умови, що $\lambda_0 = 1064\text{нм}$, та що кут зрізу кристалу $\alpha = 6,37^\circ$.

Швидкість поширення звукової хвилі визначається виразом:

$$v_{\text{п}} = 617 + (1 + 4,895\alpha^2) \quad (3.4)$$

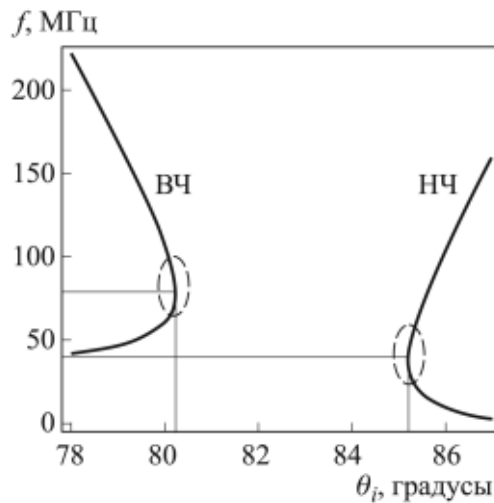


Рис. 3.1 Високо і низькочастотні дифракції для $\lambda_0 = 1064\text{ нм}$

Як впливає із залежності для $f(\theta_i)$, поблизу екстремумів високо та низькочастотних гілок дифракції, позначених на рис. 2 колами, кут падіння світлового пучка слабо залежить від частоти звукової хвилі, отже $\partial\theta_i/\partial f \cong 0$, що дозволяє використовувати ці області взаємодії для ефективного сканування лазерного пучка, а також вибрати значення кута падіння $\theta_i = 80,2^\circ$. [20-22]

Високочастотна гілка дифракції є більш широкосмуговою і за урахування $\lambda_0 = 1064\text{ нм}$ і кута $\alpha = 6,37^\circ$ дозволяє отримати дефлектор, що працює на центральній частоті 80 МГц у смузі частот управління 32 МГц. При цьому частоту двофононного розсіювання f_d можна розрахувати за наступною формулою:

$$f_d = \frac{v_{\pi}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{n_e^2 - n_0^2}{1 + (n_0^2/n_e^2) \cot^2 \alpha}} \quad (3.5)$$

Виходячи з (3.5), $f_d = 58,7\text{ МГц}$ і знаходиться поза робочою смугою дефлектора (64... 96 МГц). Залежність ефективності дифракції від частоти звукової хвилі, при $L = 2\text{ мм}$, $H = 9\text{ мм}$ і $P = 4\text{ Вт}$, наведена на рис. 3.2., із залежності впливає, що ефективність дифракції в смузі робочих частот становить не менше 75%.

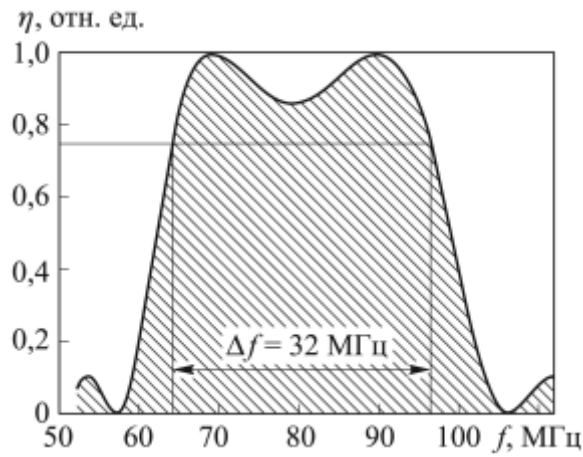


Рис. 3.2. Ефективність дифракції АОД в смузі робочих частот

Використання низькочастотної гілки дифракції менш пріорітетно, оскільки центральна частота для низькочастотної гілки становить близько 40 МГц, що не дозволяє забезпечити узгодження імпедансу п'єзоперетворювача в допустимому діапазоні робочих частот, і як наслідок, кути відхилення на виході дефлектора стають суттєво меншими, ніж у разі використання високочастотної гілки. [23]

Розглянемо розрахунок конструкції АОД (кутів σ_1 і σ_2 призми) для даної геометрії акустооптичної взаємодії на основі рис.3.3.

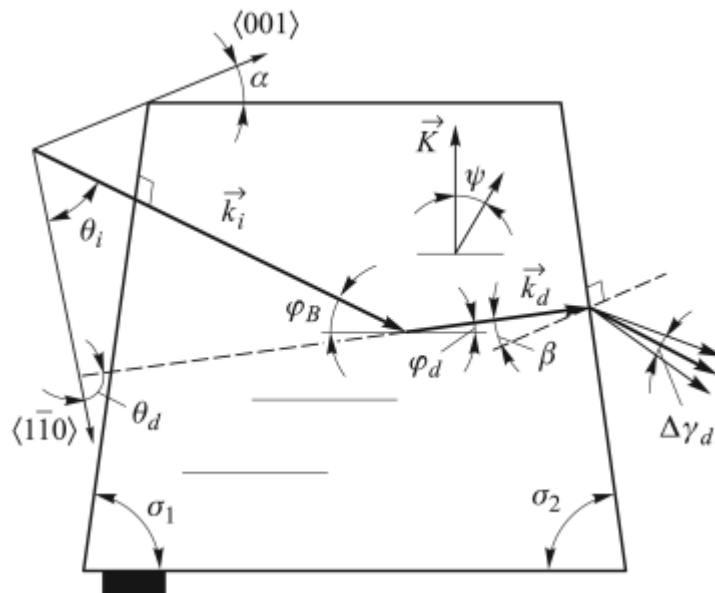


Рис.3.3. Конструкція світлозвукопроводу АОД

З рис.3.3 слідує, що:

$$\sigma_1 = 90 - \varphi_B = \theta_i + \alpha, \quad (3.6)$$

$$\sigma_2 = \theta_d + \alpha - \beta = 90 - \beta - \varphi_d, \quad (3.7)$$

де β – кут падіння дифрагованого пучка на вихідну грань, φ_B – кут Брегга, φ_d – кут дифракції.

Кути Брегга та дифракції φ_B та φ_d визначаються наступними виразами:

$$\varphi_B = 90 - \alpha - \theta_i ; \quad (3.8)$$

$$\varphi_d = 90 - \alpha - \theta_d . \quad (3.9)$$

Для зручнішого використання АОД у складі системи розгортки, як правило, задається умова паралельності падаючого і пройшовшого АОД пучків, що забезпечується вибором кута $\beta = \beta_0$, який знаходиться з умови:

$$\arcsin(n_0 \sin \beta_0) = 180 - \theta_i - \theta_d - 2\alpha + \beta_0 . \quad (3.10)$$

Як випливає з (3.10), при $\beta_0 < 3^\circ$ повний кут розгортки пучка на виході АОД визначатиметься типовою залежністю:

$$\Delta\theta_d = \lambda_0 \Delta f / v_n \quad (3.11)$$

Для досягнення розширення кутового діапазону можна використати спосіб підвищення кількості вирішуваних положень дефлектора, при якому кут падіння пучка на вхідну грань призми дефлектора обирається рівним куту Брюстера, в результаті чого апертура падаючого пучка в площині дифракції збільшується в n_i разів. Виконання умови паралельності падаючого та вихідного пучків призводить до збільшення кутів σ_2 і β , що викликає збільшення кутового діапазону розгортки пучка на виході АОД як показує подальший аналіз. [24-26]

Додатковою перевагою такої конструкції АОД є відсутність френелевих втрат на вхідній грані для пучка з p -поляризацією.

Розглянемо докладніше конструкцію АОД із розширеним кутовим діапазоном розгортки (рис. 3.4).

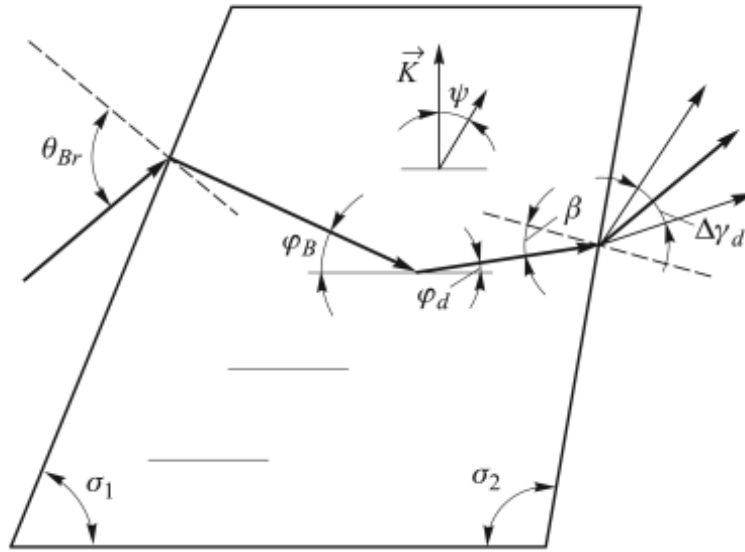


Рис.3.4. Конструкція світлозвукопроводу АОД з розширеним кутовим діапазоном

Оскільки геометрія акустооптичної взаємодії не змінювалася, то кути Брегга φ_B і дифракції φ_d будуть як і раніше описуватись виразами (3.8), (3.9), але кути σ_1 і σ_2 при основі призми зміняться і визначатимуться наступними виразами:

$$\sigma_1 = \theta_{Br} - \varphi_B = \theta_{Br} - 90 + \alpha + \theta_i \quad (3.12)$$

$$\sigma_2 = 90 + \beta - \varphi_d = \theta_d + \alpha + \beta \quad (3.13)$$

Де $\theta_{Br} = \arctg n_i = 65.6^\circ$ - кут Брюстера, а значення кута β обирається для центральної частоти. Кут $\beta = \beta_0$ що забезпечує виконання умови паралельності для АОД з гранню Брюстера, буде визначатись наступним виразом:

$$\arcsin(n_0 \sin \beta_0) = 2\theta_{Br} - 270 + \theta_i + \theta_d + 2\alpha + \beta_0 \quad (3.14)$$

Порівняння (3.10) і (3.14) показує, що в останньому випадку $\beta_0 > 23^\circ$ і можна очікувати значного збільшення діапазону кутів розгортки пучка на виході АОД (див. рис. 3.4.).

Для достовірності кут відхилення на виході АОД також можна описати як функцію частоти керування наступною залежністю:

$$\gamma(f) = \arcsin \left[n_0 \sin \left(\beta + \frac{(f-f_0)\lambda_0}{v_{\pi} n_0} \right) \right] \quad (3.15)$$

А вираз для повного кутового діапазону розгортки пучка на виході АОД може бути представлено в такому вигляді:

$$\Delta\gamma_d(\beta) = \arcsin[n_0 \sin \beta + 0.5\Delta\theta_d] - \arcsin[n_0 \sin \beta - 0.5\Delta\theta_d], \quad (3.16)$$

де $\Delta\theta_d = \lambda_0 \Delta f / n_0 v_{\text{п}}$ – повний кутовий діапазон розгортки пучка всередині АОД, Δf – робоча полоса частот керування АОД.[27]

Як слідує з виразу (3.16), (рис. 3.5.), при $\beta \leq 5^\circ$ як наприклад в АОД з типовою конструкцією світлозвукопроводу (див. рис.3.3.) величина β парктично не впливає на кутовий діапазон розгортки $\Delta\gamma_d$, але при значеннях $15^\circ \geq \beta \geq 20^\circ$ цей вплив може бути суттєвим, що дозволяє значно розширити кутовий діапазон розгортки пучка при використанні конструкції світлозвукопроводу зображеної на рис. 3.4.[28]



Рис. 3.5. Залежність кутового діапазону розгортки $\Delta\gamma_d$ АОД від кута падіння променя на вихідну грань дефлектору β

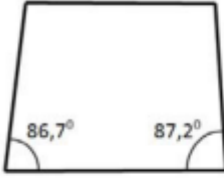
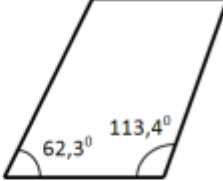
Наявність при цьому деякої нелінійності у відхиленні пучка на виході АОД внаслідок нелінійного характеру (3.16), сильно зростає при наближенні β до кута повного внутрішнього відбиття, не можна вважати серйозним недоліком, оскільки залежність для кута дифракції може бути лінеаризована підлаштуванням керуючої частоти f , особливо при використанні цифрових синтезаторів частот, що мають до 32 розрядів коду керування.[29]

На основі отриманих співвідношень був виконаний розрахунок конструкції світлозвукопроводів для типового АОД (типу А) і дефлектору зі

збільшеним кутовим діапазоном розгортки (типу Б) порівняльна характеристика яких наведена в табл. 3.1.[30]

Таблиця 3.1.

Порівняння параметрів АОД

Параметр	Тип А	Тип Б
Конструкція АОД		
Длина волны	1064 нм	
Диапазон частот управления	64. . . 96 МГц	
n_i	2,2077	
n_o	2,204	
Угол среза α	6,37°	
Угол Брэгга φ_B	3,317°	
Угол дифракции φ_d	0,047°	
β_0	2,8°	23,5°
σ_1	86,7°	62,3°
σ_2	87,2°	113,4°
Угол развертки $\Delta\gamma_d$	2,97°	5,71°

З таблиці видно, що кутовий діапазон розгортки дефлектору типу Б майже в 2 рази більший ніж діапазон розгортки в дефлекторі типу А.

Варто відмітити що входні і вихідні грані дефлектору типу А мають бути просвітлені на робочу довжину хвилі лазерного випромінювання, в даному випадку $\lambda_0 = 1064$ нм, при нормальному падінні на грані. Для дефлектору типу Б входна грань просвітлення не потребує так як вона утворює кут Брюстера з падаючим пучком p -поляризації. Вихідна грань має бути просвітлена для s -поляризації дифрагованого пучка з кутом падіння β_0 для центральної частоти керування.[31]

Як слідує з рис. 3.5., якщо відмовитися від умови паралельності вхідного і вихідного пучків, і надалі збільшуючи σ_2 і β , то кутовий діапазон розгортки $\Delta\gamma_d$ може бути ще збільшений. Практичним обмеженням тут є наближення кута σ_2 до критичного значення $\sigma_2 = \sigma_{\text{ПВО}}$, що відповідає куту повного внутрішнього відбиття $\beta_{\text{ПВО}}$, а також складністю отримання ефективного просвітлюючого покриття на вихідній грані дефлектора. На рис. 3.6. на основі співвідношень (3.15) та (3.16) побудована залежність зміни кутового діапазону розгортки пучка $\Delta\gamma_d$ як функція кута σ_2 при $n_0 = 2,204$, $\beta_{\text{ПВО}} = 27^\circ$, та $\sigma_{\text{ПВО}} \cong 117^\circ$.

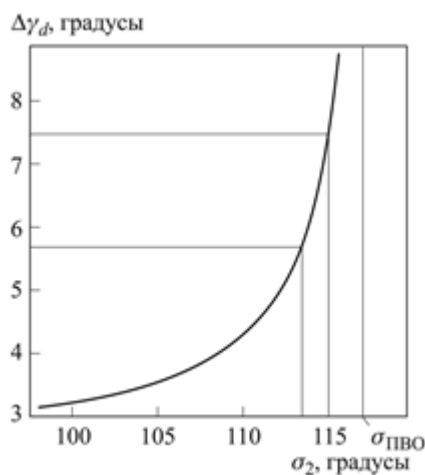


Рис. 3.6. Залежність кутового діапазону розгортки $\Delta\gamma_d$ АОД від кута нахилу вихідної грані σ_2

З отриманої залежності слідує, наприклад, що при $\sigma_2 = 115^\circ$ діапазон кутів розгортки пучка може бути збільшений до $\Delta\gamma_d = 7.5^\circ$.

3.2 Особливості проектування акустооптичного дефлектора для ЛПСН

Особливістю запропонованої методики розрахунку схеми узгодження АОД є припущення про відсутність спотворень в акустооптичному осередку, що працює на лінійній ділянці модуляційної характеристики АОД. Дана методика розрахунку включає наступні етапи:

- вибір матеріалів світлозвукопроводу та п'єзоперетворювача (ПП);
- визначення параметрів електричної еквівалентної схеми ПП;
- визначення розмірів верхнього електрода ПП;

- розрахунок електричного ланцюга, що узгоджує ПП із генератором електричного сигналу;
- розрахунок електрооптичних показників [1].

Для розрахунку схеми узгодження для п'єзоперетворювача LiNbO_4 та світлозвукопроводу TeO_2 скористаємося такими вихідними даними:

- тривалість оброблюваного сигналу $T=3$ мкс;
- середньоарифметична частота робочого діапазону $f_0 = 300$ МГц;
- відносна смуга робочих частот $\Delta\Omega=0,333$;
- рівень нерівномірності електрооптичної частотної характеристик $\Delta a=0,1$;
- довжина хвилі лазерного випромінювання $\lambda=632$ нм;
- потужність генератора сигналу в узгодженому навантаженні $P_0=100$ мкВт;
- вихідний опір генератора $R_r = 50$ Ом.

Вид та елементи електричної еквівалентної схеми електроакустичного перетворювача на основі п'єзоелектричної пластини представлені на рис. 3.7.

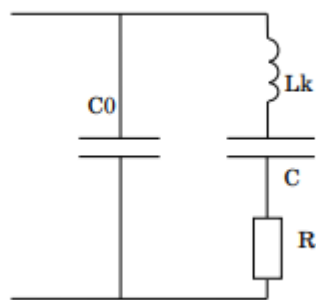


Рис. 3.7. Електрична еквівалентна схема перетворювача АОД

Визначення параметрів електричної еквівалентної схеми ПП зводиться до визначення безрозмірного коефіцієнта електричного зв'язку k та добротності Q послідовного L_kCR -контуру:

$$k = \frac{C}{C_0} = 0,2; Q = 4; k = \frac{k_{\text{ЕМ}}^2}{1 - k_{\text{ЕМ}}^2}, \quad (3.17)$$

де C - динамічна ємність послідовного L_kCR -контуру; C_0 – статична ємність послідовного L_kCR -контуру; $k_{ем}$ - коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

Якщо хвильові акустичні опори ПП та акустичного зв'язуючого шару близькі по величині, а дисипативні втрати в ПП і в акустичному зв'язуючому шарі малі, то при розрахунку добротності можна скористатися наближеною формулою:

$$Q = \frac{\pi W_{PT}}{2W_{BL}} \quad (3.18)$$

де W_{PT} – хвильовий акустичний опір ПП, W_{BL} – хвильовий акустичний опір світлозвукопроводу.

Частотну характеристику електрооптичної ефективності АОД можна записати в вигляді:

$$K_d = K_a k_1 k_2 k_3 k_4 \quad (3.19)$$

де K_a - акустооптична ефективність; k_1 - частотна залежність енергетичної ефективності перетворюючого електричного ланцюга, погоджуючої ПП із джерелом керуючого сигналу; k_2 — частотна залежність акустооптичної ефективності, зумовлена механізмом акустооптичної взаємодії; k_3 - частотна залежність акустооптичної ефективності, зумовлена згасанням акустичної хвилі при поширенні у світлозвуківому проводі; k_4 — частотна залежність дисипативних втрат в електроакустичному перетворювачі та елементах вузла його електричного збудження.

Частотна залежність перетворення узгоджувального ланцюга:

$$k_1 = \frac{P_{\Pi}}{P_0} = 1 - |\Gamma|^2 \quad (3.20)$$

де P_{Π} - електрична потужність, що поглинається входом електричного узгоджувального ланцюга; P_0 - потужність керованого сигналу; Γ – модуль коефіцієнта відбиття.

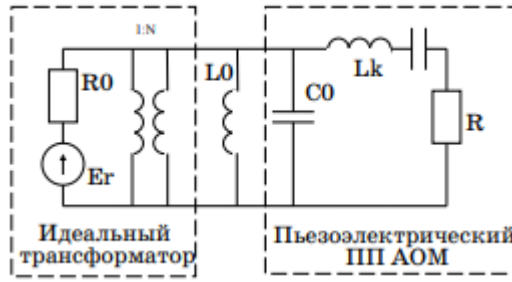


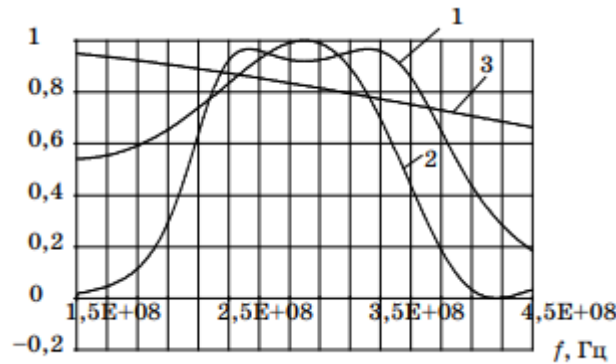
Рис. 3.8. смуговий дволанковий узгоджувальний ланцюг

Для смугового дволанкового узгоджувального ланцюга, без урахування дисипативних втрат (рис. 3.8), модуль коефіцієнта відбиття має вигляд:

$$|\Gamma|^2 = \frac{\left(Q\sqrt{k}-1-(a)^2Q^2\frac{1}{Q\sqrt{k}}\right)^2 + (a)^2Q^2\left(1-\frac{1}{Q\sqrt{k}}\right)^2}{\left(Q\sqrt{k}+1-(a)^2Q^2\frac{1}{Q\sqrt{k}}\right)^2 + (a)^2Q^2\left(1+\frac{1}{Q\sqrt{k}}\right)^2} \quad (3.21)$$

$$a = \Omega - \frac{1}{\Omega} \quad (3.22)$$

де $\Omega = \Delta f/f_0$ – відносна частота. Залежність $k_1(\Omega)$ показана на рис. 3.9, лінія 1.



3.9. Частотна залежність перетворення узгоджувального ланцюга; акустооптичної ефективності; акустооптичної ефективності, зумовленої згасанням акустичної хвилі при поширенні у світлозвукопроводі

Частотна залежність акустооптичної ефективності, зумовлена механізмом акустооптичної взаємодії, розраховується за формулою:

$$k_2(f) = \left(\frac{\sin(0.25Q_{KK}(P^2\Omega^2 - P\Omega))}{0.25Q_{KK}(P^2\Omega^2 - P\Omega)} \right)^2 \quad (3.23)$$

де Q_{KK} – параметр Клейна – Кука; $P=f_B/f_0=1$ – відносний розлад середньгеометричної частоти $k_1(f)$, по відношенню до частоти Брегга;

$$f_B = 2n \sin\left(\frac{\theta_B}{\lambda}\right) = 3 * 10^8 \text{ Гц} \quad (3.24)$$

Тут $n = 2.2$ - показник заломлення світлозвукопроводу; кут Брегга $\theta_B = 0,02257$. Залежність $k_2(f)$ (див. рис. 3.9, лінія 2). Частотна залежність акустооптичної ефективності, зумовлена згасанням акустичної хвилі при поширенні у світлозвуківому проводі, розраховується за формулою:

$$k_3 = \frac{1 - \exp(-x_0 \Omega^2)}{x_0 \Omega^2}; \quad x_0 = 2\alpha_0 v_n T / f_0^2, \quad (3.25)$$

де α_0 – коефіцієнт затухання акустичної хвилі; v_n – швидкість акустичної хвилі в світлозвуківому проводі.

Залежність $k_3(f)$ (див. рис. 3.9, лінія 3).

Втрати в електроакустичному тракті малі. Тому можна вважати, що потужність, що поглинається узгоджувальним ланцюгом, дорівнює потужності випромінюваної ($P_{\Pi} = P_a$). В цьому випадку $k_4(f) = P_{\Pi} / P_a = 1$.

Електрооптична частотна характеристика (ЕОЧХ) АОД записують в такому вигляді:

$$K_d(k, Q, x_0, Q_{KK}, P, f) = A Q_{KK} k_1(k, Q, f) k_2(Q_{KK}, f, P) k_3(k, Q, f) k_4(f) \quad (3.26);$$

$$A = \frac{\pi M_2 n_0^2 \lambda_B^2}{4h \lambda^3 \cos(\theta_B)^2} = 356,701;$$

$$Q_{KK} = \frac{2\pi \lambda L}{n_0^2 \lambda_B^2} = 21,0258.$$

де A - параметр взаємодії; M_2 - акустооптична добротність середовища світлозвуківому проводу; n_0 - показник заломлення світлозвуківому проводу; λ_B - довжина акустичної хвилі, при якій кути падаючої та дифрагрованої оптичних хвиль щодо нормалі до фронту акустичної хвилі рівні; h — поперечний розмір зовнішнього електрода; λ - довжина хвилі лазерного пучка у вакуумі; L - поздовжній розмір електрод.

Нормована ЕОЧХ розраховується як

$$K'_d(k, Q, x_0, Q_{KK}, P, f) = \frac{K_d(k, Q, x_0, Q_{KK}, P, f)}{AP_0} = Q_{KK} k_1(k, Q, f) k_2(Q_{KK}, f, P). \quad (3.27)$$

Параметри k, Q, x_0 визначаються фізичними параметрами кристала, а Q_{KK} і P - керовані параметри, за допомогою яких можна отримати заданий вигляд ЕОЧХ.

Нормована частотна характеристика показана на рис. 3.10.

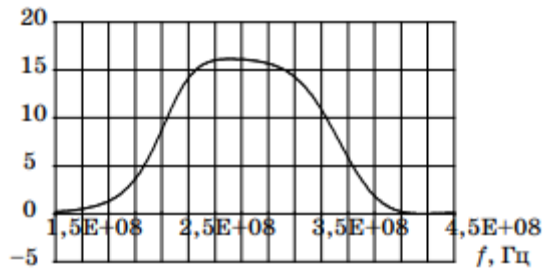


Рис. 3.10 Нормована ЕОЧХ акустооптичного дефлектору

Довжина акустооптичної взаємодії:

$$L = \frac{Q_{KK} n v_{\pi}^2}{2\pi \lambda f_B^2} = 2.076 \text{ мм.}$$

Для електроду прямокутної форми довжина поперечного перерізу п'єзоелектричної пластини:

$$H = \sqrt{\frac{2v_{\pi}^2 T}{f_H}} \quad , \quad (3.28)$$

де f_H – нижня порогова частота $f_H = -\Delta f + \sqrt{f_0^2 + \Delta f^2}$

Довжина поперечного перерізу H рівна 2,5мм.

Статична ємність :

$$C_0 = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{t} = 46,279 \text{ пФ;}$$

$$S = LH; t = \frac{v_{\pi}}{f_0} = 7 \text{ мкм,}$$

де $\varepsilon = 36,6$ – діелектрична проникність ПП; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; S – площа електроду; $t=7 \text{ мкм}$ – товщина ПП.

Опір випромінювача ПП розраховується за наступною формулою:

$$R = \frac{1}{\omega_0 C_0 k Q} = 14,3312 \text{ Ом}$$

Величина індуктивності, паралельної ПП:

$$L_0 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_0^2} = 6,082 \text{ нГн}$$

Таким чином, були розраховані електричні та геометричні параметри ПП та нормована ЕОЧХ АОД, яка є однією з головних характеристик, що визначають його якість.

Висновки до третього розділу

1. Проведена оцінка геометричних характеристик світлозвукопроводу на основі парателлуриту дозволила визначити такі його параметри:
 - а) для звичайного кута відхилення лазерного променя
 - кути при основі кристала $\sigma_1 = 86.7^\circ$; $\sigma_2 = 87.2^\circ$;
 - кут відхилення лазерного променя $\theta = 2.97^\circ$;
 - в) для збільшеного кута відхилення лазерного променя
 - кути при основі кристала $\sigma_1 = 62.3^\circ$; $\sigma_2 = 113.4^\circ$;
 - кут відхилення лазерного променя $\theta = 5.71^\circ$.
2. При зміні геометрії світлозвукопроводу кут відхилення лазерного променя може бути збільшений майже в два рази.
3. Визначені параметрів електричної еквівалентної схеми для керування пьезоперетворювачем:
 - статична ємність $C_0 = 46,279$ пФ
 - опір випромінювача $R = 14,3312$ Ом
 - величина індуктивності, паралельної ПП $L_0 = 6,082$ нГн.
4. Для типових значень ПП довжина акустичної взаємодії складатиме $L = 2.076$ мм, а висота поперечного перерізу п'єзоелектричної пластини збудження акустичних коливань дорівнюватиме $H = 2.5$ мм.

РОЗДІЛ IV

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНИМ ПРОМЕНЕМ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ»

4.1. Опис та технологічний аудит ідеї проєкту

Автоматизація керування лазерним променем наразі активно використовується в системах наведення ракет для ПТРК. Наразі розробка та виготовлення власних ПТРК є досить актуальною, так як це надає можливість відмовитись від закупок в третіх країн, а також суттєво покращити існуючі систем. Завдяки цьому досить сильно збільшиться шанс на ураження цілей. Основною проблемою подібних систем є замала швидкодія системи наведення.

Розробка ПТРК з впровадження нової системи керування лазерним променем дозволяє покращити швидкість керування ракетою спростити конструкцію та підвищити точність.

Метою цього проєкту є створення та запровадження ПТРК з використанням розробленої системи керування лазерним променем для використання її на полі бою.

Дана система має декілька аналогів, на вітчизняному ринку, після введення в експлуатацію проєкту очікується покращення результативності ураження легкоброньованих цілей та танків. Збільшення обсягів поставок ПТРК до збройних сил та зменшення витрат на оборону шляхом заміщення іноземних аналогів даною розробкою.

В даному підпункті було проаналізовано можливі напрямки застосування проєкту, вигоди, отримати які користувачі мають можливість, проведено порівняння з сучасними аналогами та замінниками.

Таблиця 4.1.

Опис ідеї проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Автоматизація керування лазерним променем, створення ПТРК з розробленою системою	Автоматизація процесу керування рухомими об'єктами	Зменшення можливості промаху під час ураження цілі.
	Впровадження системи наведення в ПТРК	Можливість більш швидкого керування ракетою під час польоту

В даній таблиці представлено основні напрямки застосування запропонованого проєкту. Основними користувачами системи є збройні сили та військові угруповання.

Таблиця 4.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних сторін проєкту

п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			(слабк а сторо на)	N (нейтраль на сторона)	S (сильн а сторон а)
		Мій проєкт	ПТРК “Корсар”	ПТРК “Стугна-П”			
1	Універсальність	Ураження рухомих та нерухомих цілей з будь-яким типом броні (танки, БТРи, десантні катери) та цілей малого розміру або на великій відстані (БПЛА, ДОТи та вертольоти	Ураження рухомих та нерухомих цілей з будь-яким типом броні (танки, БТРи, десантні катери) та цілей малого розміру або на великій відстані (БПЛА, ДОТи та вертольоти	Ураження рухомих та нерухомих цілей з будь-яким типом броні (танки, БТРи, десантні катери) та цілей малого розміру або на великій відстані (БПЛА, ДОТи та вертольоти		+	
2	Швидкодія	Висока	Середня	Середня			+

3	Вартість	Низька	Середня	Середня			+
4	Ефективна дальність	2500	2500	5000		+	
						2	2

На основі проведення оцінювання характеристик проєкту можна зробити висновок, що сильними сторонами проєкту являються швидкодія та вартість. Ефективна дальність є значущою характеристикою, але приведений в таблиці показник є цілком прийнятним в даних умовах. Універсальність приведених систем є ідентичною та повністю відповідає поставленим перед ними задачам.

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проєкту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проєкту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проєкту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/добробити?
- чи доступні такі технології авторам проєкту?

Таблиця 4.3.

Технологічна здійсненність проєкту

п/п	№	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1		Розробка ПТРК	Система керування лазерним променем	Наявні	Доступні
2		Встановлення аналітичної залежності	Математичний аналіз	Існує методика обрахунку та аналізу	Методики описані в посібниках
3		Розробка акустооптичного дефлектору	Виготовлення з халькогенідного скла	Наявні	Доступні
4		Збільшення кутового діапазону системи	Кристал парателуриту	Наявні	Доступні

На основі даних, приведених в таблиці 4.3 можна зробити висновок, що можливість технологічної реалізації даного проєкту висока, так, як технології, які будуть використовуватись в процесі розробки продукту є доступними та поєднують в собі існуючі технології та математичне моделювання.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Таблиця 4.4.

Попередня характеристика ринку стартап-проєкту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	2
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	3000000 ум.од.
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Контракт з мін. оборони
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Оцінка відповідності, контракт з мін. оборни
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	66%

Беручи до уваги аналіз проведений в таблиці 4.4, можна зробити висновок, що внутрішній ринок ПТРК є привабливим для входу. Можливий вихід на міжнародний ринок за рахунок низької собівартості та високотехнологічності системи та за умови заключення відповідних контрактів.

В таблиці 4.5 приведено групи потенційних користувачів продукту та сформовано приблизний перелік вимог до продукту для кожної групи.

Таблиця 4.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Висока швидкодія системи	Збройні сили та військові формування	Фактори формуючі поведінку потенційних клієнтів: • Доступність • Точність • швидкодія • Легкість в освоєнні • Надійність • Зручність	Вимоги до постачальника: • Постійна робота над вдосконаленням системи • Технічна підтримка • Гарантійні зобов'язання
2	Точність наведення			
3	Простота та надійність конструкції			

На основі даних, що приведені в таблиці 4.5, робимо висновок, що цільову аудиторію наведена система задовольняє. Потенційними клієнтами в даному випадку являються збройні сили та військові формування

В таблиці 4.6 приведений аналіз факторів загроз, що перешкоджають сприятливому впровадженню товару на ринок. В таблиці 4.6. приведено фактори, що сприяють успішному виходу товару на ринок.

Таблиця 4.6.

Фактори можливих загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренти	Дані технології активно розвиваються у всьому світі	Моніторинг ринку
2	Недобробка, що знижує надійність	Можливість збою в роботі та зниження точності	Додаткові випробування в різних умовах роботи
3	Збій в роботі лазерної системи	Перевантаження системи	Відновлення роботи / заміна системи

4	Низькі навички в експлуатації	Часті запитання, які відсутні в посібниках з експлуатації	Доопрацювання методичок з користування та проведення навчань особового складу
---	-------------------------------	---	---

Таблиця 4.7.

Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Підвищення попиту на продукт	Можливість збільшення виробництва та товарообігу	Розробка та впровадження модифікацій продукту, збільшення кількості виробництва шляхом укладання нових договорів на постачання
2	Імовірна відсутність на ринку аналогів	Можливість проведення монополізації сегмента	Підвищення цін на продукт, збільшені інвестиції в його подальший розвиток та впровадження
3	Ріст фінансування оборонного сегменту	Можливість збільшення виробництва та товарообігу	Підвищення цін на продукт, збільшені інвестиції в його подальший розвиток та впровадження
4	Розвиток технологій	Можливість пришвидшеного розвитку продукту	Розробка модифікацій продукту, покращення його функціоналу та характеристик

Виходячи з досліджень, представлених у вигляді таблиць 4.6 та 4.7, робимо висновки щодо ймовірних загроз та можливостей успішної реалізації проекту. Робимо висновок, що найбільшими загрозами для продукту є потенційні конкуренти та можливі недоробки та неполадки. З можливостей можна виділити підвищення попиту на продукт, ймовірність проведення монополізації ринку та можливість пришвидшеного розвитку продукту.

Наступним кроком є проведення аналізу конкуренції по ринку. Результати досліджень представлено в таблиці 4.8:

Таблиця 4.8.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції: Чиста конкуренція	Окремі компанії та покупці не мають впливу на ціну продукту	Постійне підвищення якості продукту, чесна врегульована ціна, регулярний фідбек від споживачів продукту
За рівнем: Національна	Між компаніями всередині країни	Постійна співпраця з клієнтами
За галузевою ознакою: Внутрішньогалузева	Конкуруючі підприємства всередині єдиної галузі	Формування ринкової вартості товару
За видами товарів: товарно-видова	Конкуренція товарів лише одного виду	Розвиток продукту, впровадження його модифікацій з різними варіаціями функціоналу.
За характером конкурентних переваг: нецінова	Постійне впровадження вдосконалень та покращень продукту	Підвищення рівня довіри клієнтів, збільшення витрат на вдосконалення та покращення продукту
За інтенсивністю: марочна	Компанії-конкуренти пропонують подібну продукцію	Регулювання ціни продукту

З результатів, приведених в таблиці, бачимо, що конкурентна спроможність продукту є досить високою, але в той же час присутня досить чітко виділена внутрішньогалузева конкуренція між товарів одного виду. Важливим пунктом є проведення постійної діяльності з покращення та модифікації продукту задля підвищення лояльності клієнтів.

Після аналізу конкуренції необхідно провести аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю п'яти сил Портера, дані приведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9.

Аналіз конкуренції в галузі за Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Існуючі ПТРК	Бар'єр для входу не високий потрібні дозволи від мін. оборони	Дистрибуція проходить напряду від виробників, досить невелика собівартість	Якісний контроль	Цінова політика, споживачья лояльність
Висновки:	Інтенсивність є середньою	Можливості виходу на ринок наявні, орієнтовний строк – календарний рік. Потенційні конкуренти присутні	Постачальники не диктують умови виходу на ринок	Регулярна технічна підтримка системи, оптимізація удосконалення її роботи, налаштування конкретно під клієнта	Обмеження відсутні

Беручи за основу аналіз, приведений в таблиці 4.9, підсумовуємо, що даний проєкт, незважаючи на середній рівень конкуренції, має можливості виходу на ринок. Однак дана система має якісно відрізнитися від систем-конкурентів.

Далі визначаються фактори конкурентоспроможності, приводиться їх обґрунтування. Аналіз проводить згідно з даними таблиці 4.10 та таблиці 4.11

Таблиця 4.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Висока швидкодія	Використання акутооптичного дефлектору в ситсемі керування лазерним променем, в порівнянні з системами конкурентів отримується краща швидкодія
2	Точність наведення	Виготовлення монокуляру з точністю наведення до 25см
3	Простота використання	Забезпечується завдяки використанню наявних технологій та методів, що дає легкість в освоєнні системи
4	Технічна підтримка та модернізація	Постійне допрацювання та покращення системи для покращення функціоналу

Таблиця 4.11.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ПТРК «Корсар»						
			-3	-2	-1		1	2	3
1	Висока швидкодія	20							+
2	Точність наведення	16					+		
3	Простота використання	18						+	
4	Технічна підтримка та модернізація	15				+			

За даними, приведеними в таблицях 4.10 та 4.11 робимо висновок, що проєкт має сильні сторони та є досить конкурентоспроможним.

Фінальний етап риночного аналізу можливостей впровадження проєкту - складання SWOT-аналізу стартап-проєкту. Він являє собою узагальнений аналіз слабких та сильних сторін а також загроз та можливостей в реалізації проєкту.

Таблиця 4.12

SWOT-аналіз стартап проєкту

Сильні сторони: • Висока швидкодія • Точність • Простота використання • Технічна підтримка та розвиток • Вартість	Слабкі сторони: • Конкуренція • Необхідність контракту для входження на ринок
Можливості: • Конкурентоспроможність • Закріплення на ринку товарів • Подальший розвиток продукту	Загрози: • Зменшення доходу з появою нових гравців на ринку • Зменшення попиту на товар • Втрата актуальності

Беручи за основу SWOT-аналіз, необхідно розробити стратегію подальшої поведінки на ринку, встановити перелік заходів з виводу проєкту на ринок. Альтернативи впровадження проєкту на ринок приведено в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13

Альтернативи ринкового впровадження проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Досить висока	0.5 - 1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	0.5 – 1 рік

З приведених у таблиці 4.13 даних обираємо другу альтернативу, так як продукт не є новим на ринку, найпростішим способом привабити нових клієнтів є демонстрація можливостей продукту, та збільшення взаємодії з потенційними клієнтами задля розширення обізнаності цільової аудиторії.

4.3 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Найпершим кроком в розробці ринкової стратегії проєкту є опис та вибір цільових груп клієнтів. Потенційні споживачі продукту приведені в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Збройні сили	Висока, при наявності контракту на закупку	60-70%%	Висока інтенсивність	З обмеженнями
2	Військові установи	Висока, при наявності контракту на закупку	45-50%	Нижче середньої	З обмеженнями
3	Воєнні академії	Нижче середньої	5-10%	Низька	З обмеженнями
Які цільові групи обрано: Збройні сили, військові установи					

В результаті аналізу отримуємо висновок, що з потенційних груп споживачів найбільш зацікавленими є збройні сили та військові установи. Дані користувачі зацікавлені у закупці ПТРК.

Для подальшої роботи в рамках даного сегменту ринку потрібно сформувати базову стратегію розвитку продукту. Дані приведено в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Диференційований маркетинг	Якісний продукт, до якого прихильні споживачі, низька вартість	Стратегія диференціації

Основною стратегією розвитку обрано стратегію диференціації. Для виходу проєкту на ринок вона є найефективнішою, як спосіб залучення клієнтів та отримання своєї частки на ринку.

Наступний пункт – вибір стратегії конкурентної поведінки, представлений в таблиці 4.16.

Таблиця 4.16

Вибір базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	ні	Компанія буде займатись просуванням продукту серед наявних споживачів виористовуючи свої сильні сторони	Стратегія наслідування лідера

Було обрано стратегію наслідування лідера, так як система не є «першопрохідцем на ринку». Це надасть можливість збільшення та розширення первинного попиту продукту.

Таблиця 4.17

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
1	Висока швидкодія та точність, простота використання, надійність, низька вартість	Стратегія дифереціації	Якісний продукт, до якого прихильні споживачі, низька вартість, зручність	Якість. Ціна. Зручність.

4.4 Розроблення маркетингової стратегії стартап-проєкту

Таблиця 4.18

Визначення ключових переваг концепції товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	- Швидкодія; - Надійність; - точність; - Низька вартість; - Гарантійне обслуговування.	- Висока швидкодія ; - точність - Зручність; - Легкість користування; - Надійність.	- Якість продукту є вищою за продукцію конкурентів за рахунок використання новітніх технологій - Нижча ціна в порівнянні з конкурентами.

На основі аналізу, проведеного в таблиці 4.18 робимо висновок, що до продукту в даному сегменті основними вимогами є швидкодія, надійність, точність, низька вартість. Представлений проєкт повністю задовольняє вимогам.

Таблиця 4.19

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	ПТРК з системою керування лазерним променем яка використовує акустооптичний дефлектор		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Обслуговування	М	Е
	2. Трудозатратність виготовлення	НМ	Тх
	3. Легкість користування	НМ	Тх
	Якість: технічний регламент для ПТРК		
	Пакування: присутнє		
	Марка: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» ПТРК з системою керування лазерним променем яка використовує акустооптичний дефлектор		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: можливість попереднього огляду та пробного тестування продукту		
	Після продажу: можливість створення модифікованих версій продукту, розширення наявного функціоналу, покращення характеристик		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентування методики			

Подальшим пунктом є визначення цінових меж, якими в подальшому можна буде керуватись при встановленні ціни на продукт при його реалізації.

Таблиця 4.20

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари- замінники	Рівень цін на товари- аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	246000\$	120000\$	Фінансується державою	70000-100000\$

Шляхом аналізу цін на аналоги та замінники товару, було встановлено початкові верхню та нижню межі ціни на продукт.

Наступним кроком є формування системи збуту готової продукції, дані представлено в таблиці 4.21.

Таблиця 4.21

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Збут продукту власними силами	Забезпечення техпідтримки системи на час терміну експлуатації	Нульового рівня, без посередників	За системою, що вже розроблена

Збут товару власними силами дозволяє встановити нижчі цінові межі, ніж у конкурентів, як наслідок отримуємо приріст лояльної та зацікавленої в продукті аудиторії.

Останній крок маркетингової програми - робота над концепцією маркетингових комунікацій. В основі даної концепції лежить попередньо обрана основа для позиціонування та визначена специфіка поведінки .

Таблиця 4.22

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Орієнтація на якісну роботу продукту та подальші модифікації	Формальні	Доступність аудиторії, програма підтримки користувачів	- Пошук лояльної аудиторії - Стимулювання росту продажів, підвищення попиту	Даний продукт є зручним у використанні, інноваційним та унікальним

На основі даних, що приведені в таблиці 4.22 вибрано маркетингову програму на основі наступних складових: товар, його збут, аналіз ціноутворення, які залежать від потреб аудиторії продукту, конкурентні переваги, ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в рамках якого буде впроваджуватись проєкт, та відповідна обрана альтернативу ринкової поведінки.

Висновки до четвертого розділу

На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

Метою цього проєкту є створення та запровадження ПТРК з використанням розробленої системи керування лазерним променем для використання її на полі бою.

Можливість технологічної реалізації даного проєкту висока, так, як технології, які будуть використовуватись в процесі розробки продукту є доступними та поєднують в собі існуючі технології та математичне моделювання.

Можливість ринкової реалізації проєкту є досить високою, в зв'язку з високою технологічністю товару, відносно невисоким порогом входу та ціною нижчою за ціну конкурентів.

Даний проєкт має всі можливості роботи на ринку, з врахуванням низько інтенсивної конкуренції. Відносна складність реалізації компенсована максимальною централізацією даних, ціною кінцевого продукту та простотою його використання.

Виходячи з проаналізованих груп потенційних користувачів, робимо висновок, що найбільш зацікавленими в системі являються збройні сили та військові установи. Дана цільова аудиторія є зацікавленою в технологічних ПТРК з високою швидкістю.

Альтернативний варіант впровадження проєкту - обрано стратегію диференціації. Для виходу проєкту на ринок вона є найефективнішою, як спосіб залучення клієнтів та отримання своєї частки на ринку.

Беручи до уваги підвищений інтерес і, як наслідок, попит цільової аудиторії, позитивну динаміку ринку ПТРК, та особливості кінцевого продукту, подальші впровадження та розвиток проєкту вважаю доцільним.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Для враження бронетанкової техніки в сучасних умовах бойових дій найбільш ефективним засобом є використання напіваавтоматичних та автоматичних лазерно променевих систем наведення ракет.

Прикладом вітчизняних розробок в цьому напрямку є комплекси враження броньованих та легко броньованих цілей «Корсар» і «Стugna-П».

Головним проблемним питанням при розробці цих комплексів є створення системи розгортки лазерного променя для керування ракетою, що вражає ціль.

Недоліком існуючих систем є: мала швидкодія та складність конструкторської і технологічної реалізації.

В дипломному проекті запропонована автоматизована система сканування лазерним променем з використанням акустооптичного дефлектора, яка дозволяє підвищити швидкодію, спростити конструкторську і технологічну реалізацію, покращити експлуатаційні характеристики ЛПСН.

Основні характеристики акустооптичних дефлекторів, які треба визначати при розробці автоматизованих ЛПСН такі:

- максимальний кут відхилення лазерного променя;
- роздільна здатність;
- швидкодія;
- втрати пропускання світла;
- частота акустичних коливань;
- смуга частот акустооптичного дефлектора.

Найбільш технологічними матеріалами для виготовлення акустооптичних дефлекторів є халькогенідні стекла типу $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$.

Для збільшення кута відхилення лазерного променя варто використати анізотропні матеріали, наприклад парателлурит, який має надзвичайно високу акустооптичну ефективність ($M_2 = 793 \times 10^{-18} \text{ с}^3 / \text{г}$ і вище при заданій геометрії взаємодії). Це дозволяє використовувати парателлурит для малої акустичної потужності без зниження дифракційної ефективності в порівнянні з іншими матеріалами.

Проведені теоретичні дослідження дозволили визначити основні характеристики акустооптичного дефлектора. Для відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля з кутом $\Delta\theta_d = 4^\circ = 0,06$ рад і визначених фізичних характеристиках халькогенідного скла необхідно забезпечити частоту коливань акустичної хвилі $f = 409,6$ МГц. При роздільній здатності дефлектора $N = 420$ і частоті коливань $f = 409,6$ МГц швидкодія дефлектора складатиме $\tau = 1,025 \cdot 10^{-6}$ с. Роздільна здатність дефлектора зменшується при збільшенні довжини ультразвукової хвилі і збільшується при збільшенні діаметру лазерного променя, який має бути узгоджений з розмірами дефлектора.

Проведена оцінка геометричних характеристик світлозвукопроводу на основі парателлуриту дозволила визначити такі його параметри:

- а) для звичайного кута відхилення лазерного променя
 - кути при основі кристала $\sigma_1 = 86.7^\circ$; $\sigma_2 = 87.2^\circ$;
 - кут відхилення лазерного променя $\theta = 2.97^\circ$;
- в) для збільшеного кута відхилення лазерного променя
 - кути при основі кристала $\sigma_1 = 62.3^\circ$; $\sigma_2 = 113.4^\circ$;
 - кут відхилення лазерного променя $\theta = 5.71^\circ$.

При зміні геометрії світлозвукопроводу кут відхилення лазерного променя може бути збільшений майже в два рази.

Визначені параметрів електричної еквівалентної схеми для керування пьезоперетворювачем:

- статична ємність $C_0 = 46,279$ пФ
- опір випромінювача $R = 14,3312$ Ом
- величина індуктивності, паралельної ПП $L_0 = 6,082$ нГн.

Для типових значень ПП довжина акустичної взаємодії складатиме $L = 2.076$ мм, а висота поперечного перерізу п'єзoeлектричної пластини збудження акустичних коливань дорівнюватиме $H = 2.5$ мм

Список використаних джерел

1. Начало производства беспроводных ПТУР TOW. – «Сборник научно-технической информации». Тула, Конструкторское бюро приборостроения, 2008, №1 (23), С.63-65.
2. Дмитриев В. Новые противотанковые управляемые ракеты для сухопутных войск США. – «Зарубежное военное обозрение», 2006, №1, С.15-19.
3. Білик М. С., Кучеренко О.К. Визначення вимог до точності базування сітки у напіваактивній системі наведення ракет // Збірник матеріалів XIV Науково-практичної конференції «Погляд у майбутнє приладобудування» / ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2021. С. 86-90
4. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.luch.kiev.ua/ru/produksiya/protivotankovye-kompleksy/legkij-protivotankovyj-raketnyj-kompleks-korsar>
5. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.luch.kiev.ua/ru/produksiya/protivotankovye-upravlyaemye-rakety/vystrel-s-protivotankovoj-upravlyaemoj-raketoj-stugna>
6. Zaloga Steven J. Precision-Guided Weapons Rule. – «Aviation Week and Space Technology», 2004, Т.160, №3, Р.173-193.
7. Юровский Е.К., Ивания С.П. Боеприпасы пассивных помех для противодействия высокоточному оружию. Новосибирск, изд-во НГТУ, 2002, 55 с.
8. Sitton R.L. Optical Command and Beamrider missile guidance. Proc. Soc. Photo-Optical Instrum. Eng., 1981, 317 p.
9. Утемов С. В. Математическая модель автоматической лазерно-лучевой системы наведения гиперзвуковых ракет / С. В. Утемов. // Вестник ВГТУ. – 2010. – №3.
10. Oshe G.R., Luck C.F., Seavey R.E., Phelan R.K. CO2-laser – forward looking infrared (FLIR) integration concepts / G.R. Oshe, C.F. Luck, R.E. Seavey, R.K. Phelan // Electro – Optics Department Laboratories Boston Post Road. – 1984. – 64 с.
11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/polytechnic/240/АКУСТООПТИЧЕСКИЙ>
12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/1808562
13. Программа ATGW создания ПТУР третьего поколения // Зарубежная военная техника. – Сер. 2. – 1983. – № 10. – С. 3-4.
14. Білик М.С., Кучеренко О.К. Пристрій відхилення лазерного променя для лазерно-променевої системи наведення // Збірник матеріалів XVII науково-практичної конференції «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» / ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2021. С. 34-38

15. Пристрій відхилення лазерного променя для лазерно-променевої системи наведення: пат. 151132 Україна: МПК F41G7/24. № u202107080; заявл. 10.12.21; опубл. 08.06.22, Бюл. № 23. 6 с.
16. Янг Э.Х., Шикай Я.О. Расчет акустооптических устройств // ТИИЭР - 1981. - т.69. - №1. - С. 61-76.
17. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов: Пер. с франц. / Под. ред. В.В. Леманова. - М.: Наука, 1982. - 424 с.
18. Кучеренко О.К., «Визначення параметрів акустооптичного дефлектора для лазерно-променевої системи наведення», *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, вип. 62(2), с. 17–22, Груд 2021.
19. Gordon E.I. // *Appl. Opt.* 1966. V. 5. № 10. P. 1629.
20. Voshol C.P.L., Spiekerman A.J.G. // *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics.* 1975. V. 22. № 2. P. 143.
21. Aboujeib J., Perennou A., Quintard V., Bihan J
22. Design and fabrication of acousto-optic devices / Ed. Akis P. Goutzoulis, Dennis R. Pape, Sergei V. Kulakov. – N. Y.: University of Rochester, 1994. – 497 p.
23. Dixon R.W. Acoustic diffraction of light in anisotropic media. *IEEE Journ. Quant. Electr.*, 1967, vol. QE-3, no. 2, pp. 85–93.
24. Magdich L.N., Molchanov V.Ya. Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye [Acousto-optic devices and their application]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1978. 112 p.
25. Korpel A. Acousto-optics. N.Y. and Basel: Marcel Dekker, Inc., 1988. 265 p. (Russ. ed.: Korpel A. Akustooptika, per. s angl. Moscow, Mir Publ., 1993. 240p.)
26. Semenov V.P. The anisotropic acousto-optic deflector for uniaxial crystals with optical activity. *Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. The Russ. J. Appl. Phys.], 1981, vol.51, no. 10, pp. 2090–2095 (in Russ.).
27. Warner A.W., White D.L., Bonner W.A. Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite. *Appl. Phys. Letters*, 1972, vol. 43, no. 11.
28. Balakshiy V.I. Fizicheskie osnovy akustooptiki. [Physical basis of optoacoustics]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1985. 280 p.
29. Yano T. TeO₂ anisotropic Bragg light deflector without midband degeneracy. *Appl. Phys. Letters*, 1975, vol. 26, no. 12, pp. 689–691.
30. Magdich L.N., Molchanov V.Ya. About the theory of acousto-optical interaction in a strong field. *Opt. Spektrosk.* [Optics and Spectroscopy], 1980, vol. 48, no.1, pp. 159–159.
31. Semenov V.P., Magdich L.N., Bondarenko D.A. Akustoopticheskiy anizotropnyy deflektor [Acousto-optic anisotropic deflector]. Patent RF, no. 2462739, 2012.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Білика Миколи Сергійовича

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5
1	Визначення вимог до точності базування сітки у напівактивній системі наведення ракет (<i>стаття</i>)	XVI Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» , м. Київ, 2020	4	Кучеренко О.К.
2	Пристрій відхилення лазерного променя для лазерно-променевої системи наведення (<i>стаття</i>)	XVII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» , м. Київ, 2021	4	Кучеренко О.К.
3	Пристрій відхилення лазерного променя для лазерно-променевої системи наведення(<i>патент</i>)	пат. 151132 Україна: МПК F41G7/24. № u202107080; заявл. 10.12.21; опубл. 08.06.22, Бюл. № 23.	6	Кучеренко О.К.

Автор _____

Білик М.С.

Зав. каф. КІОНС _____

Надія БУРАУ

ДОДАТОК Б

Функціональна схема системи керування лазерним променем

