

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри АКСУ  
\_\_\_\_\_ Мельник Ю.В.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ  
“МАГІСТР”

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»

Тема: «Оптичний прилад реєстрації надмалих об’ємних деформацій»

Виконавець: студент групи СУ- 214М, Савранський Віктор Андрійович

Керівник: кандидат техн.наук, доцент, Дивнич М.П.

Консультант розділу Охорона праці: \_\_\_\_\_  
(підпис)

Козлітин.С.О.  
(П.І.Б.)

Консультант розділу  
Охорона навколишнього середовища: \_\_\_\_\_  
(підпис)

Явнюк.А.А.  
(П.І.Б.)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_  
(підпис)

Дивнич М.П.  
(П.І.Б.)

Київ 2022

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігацій, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКСУ

\_\_\_\_\_ Мельник Ю.В.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

## ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Савранського Віктора Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Оптичний прилад реєстрації надмалих об'ємних деформацій

затверджена наказом ректора від «\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_.

№\_\_\_\_\_

2. Термін виконання роботи: з 5 вересня по 30 листопада 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: чутливість приладу до зміни діаметра мікрочастинки 110 мВ на 10 нм, або 11 мВ на 1нм, при коефіцієнті глибини модуляції  $k_m = 1$ .

4. Зміст пояснювальної записки: Загальні відомості про деформацію, Лазерні методи вимірювання фізичних величин, Розробка математичної моделі формування сигналу лазерного доплерівського вимірювача швидкості, Особливості зміни фази доплерівського сигналу в залежності від напрямку прийому розсіювання випромінювання, Висновки та захист кваліфікаційної роботи

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: рисунки з презентації: види деформації, прилади вимірювання деформації, спрощена схема детектора LIGO, система координат для визначення складових хвилі, розсіяних в зоні приймальної апертури оптичного приладу, перетворення систем координат для визначення кутів в якому виходить розсіяне випромінювання від першого та другого лазерного променя, приймальна діафрагма, залежність  $k_m=f(d)$ . озрахунки з

кроком  $\Delta d=(5;10)$  нм, функціональна схема реєстрації надмалих об'ємних деформацій.

#### 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підбір літератури та початок написання вступу	12.09-18.09.2022	
2	Розділ 1. Загальні відомості про деформацію	19.09-26.09.2022	
3	Розділ 2. Лазерні методи вимірювання фізичних величин	03.10-10.10.2022	
4	Розділ 3. Розробка математичної моделі формування сигналу лазерного доплерівського вимірювача швидкості	17.10.2022	
5	Розділ 4. Особливості зміни фази доплерівського сигналу в залежності від напрямку прийому розсіювання випромінювання	20.10-28.10.2022	
6	Розділ 5. Охорона праці	02.11.2022	
7	Розділ 6. Охорона навколишнього середовища	07.11.2022	
8	Висновки та захист кваліфікаційної роботи	11.11-25.11.2022	

#### 7. Консультація з окремих розділів

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання прийняв	Завдання прийняв
Охорона праці	Козлітин С.О.		
Охорона навколишнього середовища	Явнюк А.А.		

8. Дата видачі завдання: “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 р.

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Дивнич М.П.  
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис студента)

Савранський В.А.  
(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Оптичний прилад реєстрації надмалих об'ємних деформацій» містить: 117 сторінок, 50 рисунків, 1 таблицю, 39 літературних джерел.

**Об'єкт дослідження** – є процес функціонування оптичного приладу реєстрації надмалих об'ємних деформацій.

**Предметом дослідження** є оптичний прилад реєстрації надмалих об'ємних деформацій.

**Мета роботи** – розробка функціональної схеми оптичного приладу реєстрації надмалих об'ємних деформацій.

**Методи дослідження** – робота з науково-технічною літературою, метод Релея, метод математичного моделювання процесу формування сигналу оптичного приладу реєстрації надмалих об'ємних деформацій, з використанням теорії розсіювання Мі.

Розглянуто класифікацію види деформації, методи вимірювання деформації, проаналізовано основні принципи дії лазерних вимірювальних приладів, розглянута математична модель формування сигналу оптичного приладу реєстрації надмалих об'ємних деформацій, розроблена функціональна схема оптичного приладу реєстрації об'ємних надмалих деформацій.

ЛАЗЕР, ВИМІРЮВАННЯ, ДЕФОРМАЦІЯ, ОПТИЧНИЙ ПРИЛАД, РОЗСІЯННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДЕФОРМАЦІЮ.....	8
1.1. Види деформації.....	8
1.1.1. Лінійна деформація.....	8
1.1.2. Деформація зсуву.....	9
1.1.3. Об'ємна деформація.....	10
1.1.4. Деформація кручення.....	11
1.1.5. Напруга при крученні.....	13
1.1.6. Деформація розтягування-стиснення.....	14
1.2. Методи вимірювання деформації.....	18
1.3. Напруженість гірських порід.....	26
РОЗДІЛ 2. ЛАЗЕРНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН.....	33
2.1. Лазерний вимірювач параметрів вібрації.....	33
2.2. Лазерні висотоміри та далекоміри.....	36
2.3. Лазерний прилад для визначення дисперсного складу мікрозабруднень авіаційного палива.....	45
2.4. Лазерні доплеровські вимірювачі швидкості.....	49
2.4.1. Лазерні доплеровські вимірювачі швидкості та довжини.....	51
2.5. Лазерний доплерівський вимірювач істинної повітряної швидкості важкого безпілотного літального апарату.....	54
2.6. Лазерні прилади вимірювання кутової швидкості.....	57
2.7. Застосування лазера у навколишньому світі.....	62
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ОПТИЧНОГО ПРИЛАДУ РЕЄСТРАЦІЇ НАДМАЛИХ ОБ'ЄМНИХ ДЕФОРМАЦІЙ.....	69
3.1 Математична модель сигналу.....	71
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ОПТИЧНОГО ПРИЛАДУ НАДМАЛИХ ОБ'ЄМНИХ ДЕФОРМАЦІЙ.....	84
4.1. Особливості зміни фази.....	84
4.2. Функціональна схема оптичного приладу.....	90

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	95
5.1. Положення про охорону праці.....	95
5.2. Фактори ризику на виробництві.....	96
5.3. Класифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	96
5.4. Нормування лазерного випромінювання.....	98
5.4.1. Розрахунок природного освітлення робочого місця персоналу.....	101
5.5. Загальні положення про безпеку при роботі з лазерними пристроями.....	103
5.6. Вимоги до безпеки в аварійних ситуаціях.....	107
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	108
6.1. Заходи захисту від шкідливої дії лазерного випромінювання.....	109
6.2. Вплив лазерного випромінювання на навколишнє середовище та живі організми.....	110
6.3. Заходи захисту від шкідливої дії лазерного випромінювання.....	111
ВИСНОВОК.....	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	115

## ВСТУП

*Актуальність дослідження.* В даний час, актуальним є вивчення гірських порід земної кори, які перебувають під дією сил різної природи і виникають внаслідок літостатичного навантаження, тектонічних, тектоно-магматичних, метаморфічних процесів, діагенетичних перетворень та інших факторів. Дія цих сил призводить до виникнення різних за типом, масштабами та інтенсивністю полів напружень, і виникають різні геологічні структури. За своїм природним походженням такі породи знаходяться під впливом сил іншої природи. Залежно від місця їх прикладання ці сили можуть бути поверхневими і об'ємними. Поверхневі сили виникають поза аналізованої області земної кори і впливають на неї ззовні, об'ємні сили виникають всередині самих блоків. Вони впливають на кожен елементарний об'єм гірських порід. До об'ємних сил відносять силу тяжіння, сили стиснення об'єму внаслідок теплового розширення гірських порід, зміни об'єму під час реакцій гідратації-дегідратації тощо. Об'ємне стиснення відбувається в результаті обмеженого розширення. Такі сили виникають внаслідок зменшення об'єму гірських порід.

Вплив літостатичного тиску зростає з глибиною внаслідок підсумовування ваги кожного окремого об'єму породи. Тому для оцінки інтенсивності впливу зусиль на гірські породи використовуються специфічні характеристики - напруження, які є внутрішніми силами, що виникають у твердому тілі в результаті деформації при прикладенні до нього сили і дії на його елементарні поперечні перерізи. Щоб зареєструвати зміну літостатичного тиску, необхідно виміряти малі деформації породи.

Тому, актуальною задачею є розробка лазерного приладу реєстрації надмалих об'ємних деформацій.

# 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДЕФОРМАЦІЮ

## 1.1. Види деформації

Зміна розмірів і форми твердого тіла під дією зовнішніх сил (навантажень) або інших впливів (наприклад, температури, електричних чи магнітних полів) відомо як деформація. Вона виникає внаслідок взаємодії (притягання й відштовхування) та переміщення частинок деформованого тіла (середовища). Сили пружності прагнуть повернути частинки в стан рівноваги (тобто відновити попередню форму тіла). Ці сили діють як всередині деформованого тіла, між його частинками, так і на інші тіла, що спричинили його деформацію.

Деформації виникають з причин різної фізичної природи. Пружні деформації однозначно пов'язані з напруженням. Природження пластичних деформацій також пов'язано зі зміною напруження, але неповоротно. Разом ці обидві деформації, які пов'язані зі зміною напруження, є "миттєвими". Температурні деформації пов'язані зі зміною температури тіла. Деформації повзучості є такими, зміна яких пов'язана з природженням часу. Деформації радіаційного розпухання пов'язані з отриманою матеріалом дозою випромінювання.[1]

### 1.1.1. Лінійна деформація

Для довільного тіла, що зазнає довільного деформування значення лінійних деформацій може відрізнятися у залежності від напрямку, у якому вони розглядаються. У цьому випадку лінійні деформації розглядаються в проєкціях на осі декартових координат. Тоді деформація відрізка АВ, що лежить на осі x і точка В яка після деформації переміститься у точку В' запишеться:

$$\epsilon_x = \lim_{B \rightarrow A} \frac{|AB'| - |AB|}{|AB|} \quad (1)$$

					НАУ. 22. 01 .55 000 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	<b>ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДЕФОРМАЦІЮ</b>					
Розроб.	Савранський В.А.							Лім.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дивнич М.П.									
Реценз.								ФАЕТ- 214 гр.		
Н. Контр.	Дивнич М.П.									
Затверд.	Мельник Ю.В.									



Провівши подібний аналіз для осей  $y$  і  $z$  можна отримати відповідно  $\varepsilon_y$  і  $\varepsilon_z$ . Маючи дане поле переміщень (компоненти вектора переміщень для усіх точок тіла) можна записати у загальному як:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

Лінійна деформація  $\varepsilon$  у довільній точці тіла є границею відношення приросту довжини  $\Delta L$  до початкової довжини  $L$ , коли сама довжина прямує до нуля.[2]

Тобто, при визначенні деформації в точці розглядаються зміни в її безпосередньому околі.

### 1.1.2. Деформація зсуву

Вид деформації, при якому величина зміщення кожної точки тіла зростає в напрямку, перпендикулярному до напрямку зміщення. Аналогічно оцінюється деформація зсуву (зміна кутів) у безпосередньому околі точки. Кутова деформація  $\gamma$  є границею зміни кута між двома довільно обраними відрізками в тілі при прикладенні навантаження, коли довжини цих відрізків прямують до нуля. Маючи дане поле переміщень як і вище маємо:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}; \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}; \gamma_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}$$

Одним із поширених форм деформації є зсув окремих шарів виробу у вертикальній або горизонтальній площині. Таке усунення – *деформація зсуву*. Зміна положення може викликати поступове чи різке зміна початкової форми конструкції чи окремої деталі. Види деформації характеризують порядок переміщення і визначають порядок розрахунку основних характеристик. У технічній механіці розглядають два види деформації зсуву: плавну і різку (відрив або різання). Основною ознакою, що характеризує деформацію зсуву, є збереження сталості обсягу. Незалежно від цього, у напрямі діють силові чинники цей параметр залишається незмінним.

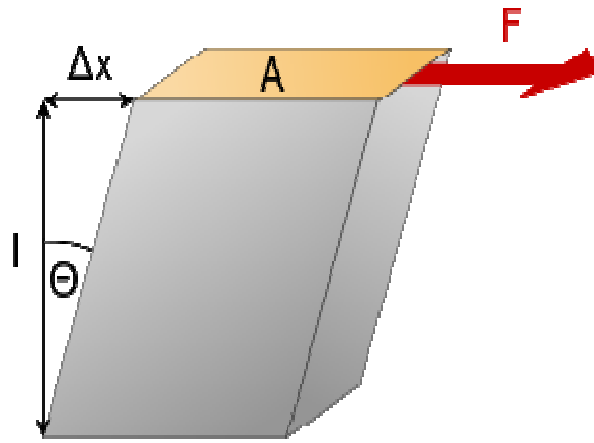


Рис.1.1. Деформація зсуву

Приклади прояву деформації зсуву можна знайти під час проведення різноманітних робіт:

- при розпилюванні бруса;
- відрізання або рубання металу;
- внаслідок порушення цілості кріплення металевих або дерев'яних деталей, з'єднаних металовиробами;
- балки у місцях кріплення опор;
- місця скріплення мостових прольотів;
- кріплення на перемичках з'єднання залізничних рейок;

За певних умов спостерігається чисте зрушення. Він визначається як зсув, при якому на всі чотири грані (наприклад, прямокутної деталі) впливають тільки напруги, спрямовані по дотичній до поверхні. У цьому випадку відбудеться плавне зрушення всіх шарів деталі від верхніх до нижніх шарів. Тоді зовнішня сила змінює форму деталі, а об'єм зберігається.[3]

### 1.1.3. Об'ємна деформація

Під дією зовнішнього навантаження пружне тіло деформується, його обсяг змінюється, і в ньому накопичується потенційна енергія. У процесі розвантаження тіла потенційна енергія є у вигляді роботи, що здійснюється внутрішніми силами. У загальному випадку, коли напружений стан у різних точках тіла різний, для визначення зміни його об'єму та кількості накопиченої ним потенційної енергії

необхідно знати зміну об'єму та кількість енергії в кожній елементарній частинці тіла.

Оберемо елементарний паралелепіпед з ребрами біля деякої точки тіла до його деформації  $dl_1$ ,  $dl_2$ , та  $dl_3$ , так, щоб його грані збігалися із головними площинами.

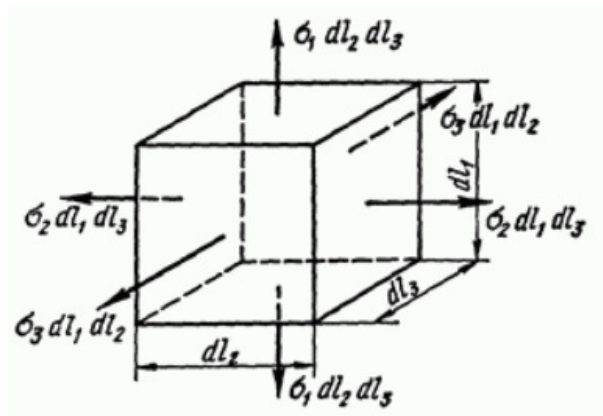


Рис.1.2. Приклад паралелепіпеда до деформації

У окремому випадку просторового напруженого стану, коли  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma > 0$  (такий випадок називається просторовим рівномірним розтягуванням), відносна зміна об'єму:  $\theta = \frac{1-2\mu}{E} * 3\sigma$ .

Об'єм куба, який знаходиться в умовах просторового рівномірного розтягу, не може зменшуватись, так як  $\theta$  в цьому випадку не може бути від'ємним, а тому, коефіцієнт Пуассона для будь-яких матеріалів не може бути більше 0,5.[4]

#### 1.1.4. Деформація кручення

Під крученням розуміють вид деформації, властивий умов докладання до тіла сили поперечної площині. В результаті цього в поперечному розрізі формується момент, що крутить. Деформаціям кручення піддаються вали та пружини. Під торсіоном розуміють стрижень, що функціонує на кручення, застосовується в якості пружного елемента.

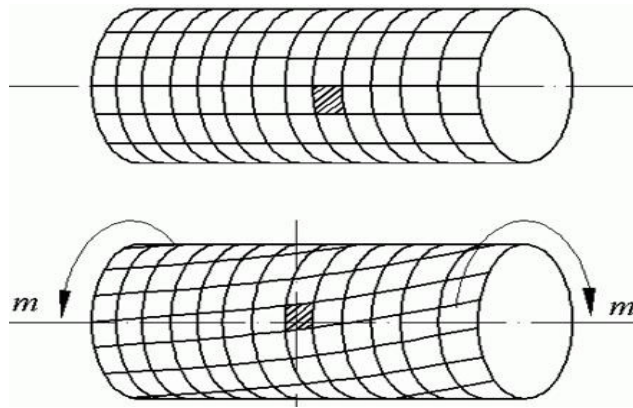


Рис.1.3. Деформація кручення

Для круглих валів, найбільш широко застосовуваних у техніці, розроблено теорію кручення. Вона заснована на трьох положеннях:

- після деформації зберігається плоский поперечний переріз деталі.
- при деформації радіуси, що проходять упоперек деталі, не викривляються і повертаються на рівний кут.
- при деформації поздовжні волокна зберігають розміри, отже розділяючі поперечні перерізи відстані незмінні.

Деформації кручення розглядаються як взаємні повороти перерізів. Вони утворюються в результаті дії на стрижень пар сил з площинами дії, перпендикулярними до його поздовжньої осі. Кут закручування циліндричного стержня в межах пружних деформацій під дією моменту  $T$  може визначитись з рівняння закону Гука для випадку кручення

$$\varphi = \frac{Tl}{J_0G} \quad (1.1)$$

де  $l$ - довжина стрижня;  $J_0$ - геометричний полярний момент інерції;  $G$ - модуль зсуву.

Відношення кута закручування  $\varphi$  до довжини  $l$  називають відносним кутом закручування:

$$\theta = \frac{\varphi}{l} \quad (1.2)$$

Поширений випадок деформації кручення виникає тоді, коли до тіло, наприклад, мотузку, намагаються одночасно прокрутити в різних місцях в протилежних

напрямок. Величина зміщення в такому випадку залежить також від віддалі до точок, в яких прикладені крутильні моменти. Крутий момент представлений силовим фактором, що зумовлює кругове пересування перерізу щодо перпендикулярної осі або перешкоджає йому. Його значення дорівнює сумі зусиль, що скручують, по одну сторону від даної точки. Позитивними вважають внутрішні моменти, спрямовані проти годинникової стрілки із боку зовнішньої нормалі (відкинутої частини). При цьому відповідний зовнішній момент має напрямок, що збігається з ходом стрілки годинника.

Під епюрою моментів, що крутять, розуміють графік, що відображає закон їх зміни по довжині або перерізу деталі. При розділенні деталі по довжині на три ділянки відповідно до методів перерізів вийде, що для першого (правого) фрагмента спостерігається лінійна залежність моменту, що крутить, від координати перерізу через вплив рівномірно розподіленого навантаження, для другого і третього ділянок дана залежність відсутня. При цьому в точках застосування зовнішніх зосереджених зусиль спостерігаються стрибки, що відповідають їх величині. У перерізі спостерігається лінійна зміна, яка визначається законом дотичних напруг, у прямій залежності від відстані від центру.[5]

### **1.1.5. Напряма при крученні**

Виходячи з наведеного вище визначення деформації кручення, в поперечному перерізі спостерігаються лише дотичні напруги, спрямовані перпендикулярно до радіусів. Вони визначаються для конкретної точки як добуток відношення крутного моменту до геометричного полярного моменту інерції та відстані даної точки від осі обертання. Зміна дотичних напруги є лінійною і вони досягають свого максимального значення на поверхні при найбільших значеннях моменту та відстані від осі обертання, тому її значення розраховується як часткове значення найбільшого моменту та полярного моменту опору.

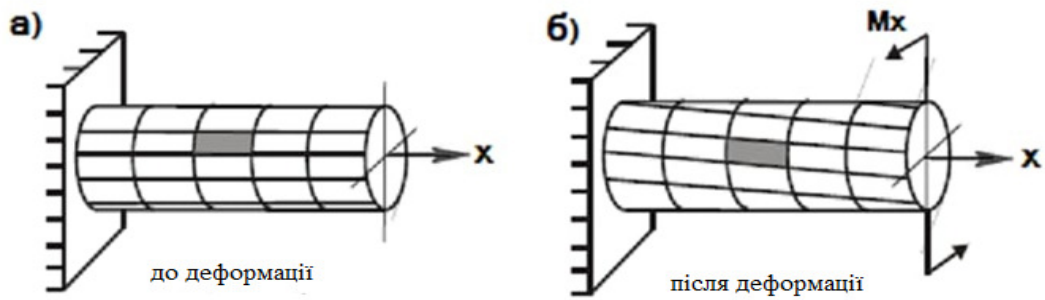


Рис.1.4. Напряга при крученні

Застосовуючи цю умову, розраховують інші параметри: за коефіцієнтами потужності, що створюють крутний момент - показник опору, а потім розміри поперечного перерізу в залежності від форми або за розміром поперечного перерізу - максимальний допустиме значення крутного моменту для нього і виходячи з останнього допустимого значення зовнішніх навантажень.

Дотичні напруги, за законом парності, формуються при крученні як у поперечних, і у поздовжньому напрямках. Внаслідок цього у всіх точках валу спостерігається деформація у вигляді чистого зсуву. Головні напруги спрямовані до утворює під кутом  $45^\circ$ .

З викладених вище даних випливає, що видалення матеріалу в районі осі валу незначно позначається на міцності через те, що ця частина мало навантажена. При рівних площі перерізу та масі деталей кільцеві варіанти характеризуються великими полярними моментами опору та інерції порівняно із суцільними валами. Тобто при рівній масі порожнисті варіанти міцніші і жорсткіші, а при однакових показниках міцності та жорсткості легше. Названі параметри визначають стійкість даних виробів до деформації.[5]

### 1.1.6. Деформація розтягування-стиснення

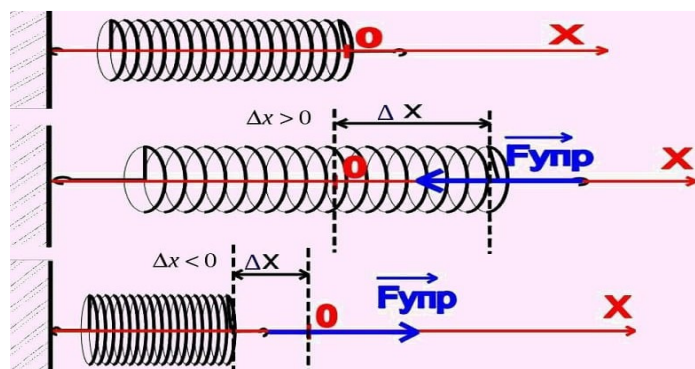


Рис.1.5. Схема зображення деформації розтягування-стиснення

Закон Гука для пружної деформації розтягування/стиснення свідчить, що нормальна напруга перебуває у лінійній залежності (прямо пропорційно) до відносного подовження/укорочення. Відносна деформація є відношенням зміни довжини бруса до його початкових розмірів, це безрозмірна величина, яка іноді відбивається у відсотковому співвідношенні. При розтягуванні або стиску у бруса змінюється не тільки довжина, але відбуваються поперечні деформації: при стисканні утворюється потовщення, при розтягуванні товщина перерізу стає меншою. Величини цих змін знаходяться в лінійній залежності одна від одної, причому встановлено, що коефіцієнт пропорційності Пуассона залишається завжди незмінним для досліджуваного матеріалу, і можуть виникати 2 види деформації. Перша – пружна, друга – пластична. Для пружної деформації характерне відновлення початкових параметрів після припинення дії. У разі пластичної стадії деформації матеріалу він втрачає і не відновлює форму та розміри. Величина впливу, для переходу з одного виду в інший є межею плинності.

Для розрахунку переміщення при розтягуванні бруса або стрижня використовують метод поділу на ділянки, в рамках яких здійснюється застосування зовнішніх впливів. У точках дії сили обчислюють величину зміни довжини, використовуючи формулу:  $\Delta l / EA$ , тобто вона залежить жорсткості перерізу, довжини бруса або стрижня і величини подовжньої сили, що діє.

Поперечні деформації (стає товстішим при стисканні та тонким при розтягуванні) також характеризуються абсолютною та відносною величиною деформації. Перша – різниця між розміром перерізу після та до застосування зовнішніх впливів, друга – відношення абсолютної деформації до його вихідного розміру. Коефіцієнт Пуассона, що відображає лінійну залежність поздовжньої та поперечної деформацій, визначає пружні якості матеріалів та вважається незмінним для розтягування та стиснення. Поздовжні найбільш наочно відображають процеси, що відбуваються в брусі або стрижні при зовнішній дії. Знаючи величину будь-якої з них (поздовжньої чи поперечної) та використовуючи коефіцієнт Пуассона, можна розрахувати значення невідомої.

Для визначення величини деформації пружини при розтягуванні можна застосувати закон Гука для пружин:

$$F = kx$$

У разі  $x$  – збільшення довжини пружини,  $k$  – коефіцієнт жорсткості (одиниця виміру (Н/м),  $F$  – сила пружності, спрямовану протилежну від усунення бік.

У кристалах пружна деформація проявляється в зміні відстаней між вузлами і перекосі кристалічної решітки без зміни порядку розташування атомів; і початкова конфігурація відновлюється при знятті навантаження. Одним з механізмів пластичного деформування в кристалі є рух і розмноження дислокацій. При напруженні вищому за границю пружності рух дислокацій викликає безповоротну перебудову кристалічної структури, тобто деформація стає пластичною. У полікристалічному матеріалі, яким є метали, як правило, одна частина зерен деформується пружно, інша — пластично.[6]

## 1.2. Модуль пружності

Для будь-якого тіла існує межа прикладеного зусилля, після якого деформація перестає бути пружною, тіло не повертається у вихідну форму і до вихідних розмірів, а залишається в деформованому стані або руйнується.

Модуль Юнга (або модуль поздовжньої пружності та модуль пружності першого роду) це важлива механічна характеристика речовини. Він є мірою опірності поздовжнім деформаціям та визначає ступінь жорсткості. Він позначається як  $E$ , вимірюється н/м<sup>2</sup> або Па. Такий важливий коефіцієнт застосовують при розрахунках жорсткості заготовок, вузлів та конструкцій у визначенні їх стійкості до поздовжніх деформацій. Речовини, що застосовуються для виготовлення промислових і будівельних конструкцій, мають, як правило, дуже великі значення  $E$ . І тому на практиці значення  $E$  для них наводять у гігаПаскалях ( $10^{12}$  Па).



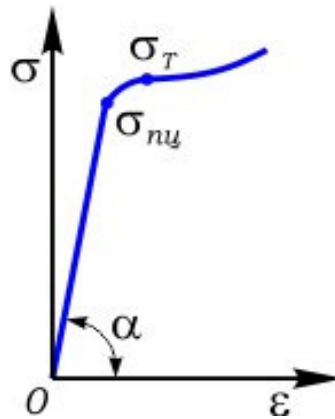


Рис.1.6. Графік тесту на розтяг

де  $E$ - частка від поділу нормальних напруг  $\sigma$  на відносне подовження  $\varepsilon$ .

### 1.2.1. Фізичний зміст модуля Юнга

Під час примусової зміни форми предметів усередині них породжуються сили, що чинять опір такій зміні, і прагнуть відновлення вихідної форми і розмірів пружних тіл. Якщо ж тіло не чинить опору зміні форми і після закінчення впливу залишається в деформованому вигляді, то таке тіло називають абсолютно непружним, чи пластичним.

Р. Гук досліджував подовження стрижнів із різних речовин, під впливом підвішених до вільного кінця гир. Кількісним виразом ступеня зміни форми вважають відносне подовження, що дорівнює відношенню абсолютного подовження та вихідної довжини. В результаті серії дослідів було встановлено, що абсолютне подовження пропорційно з коефіцієнтом пружності вихідної довжини стрижня та деформуючої сили  $F$  і обернено пропорційно площі перерізу цього стрижня  $S$ :

$$\Delta l = \alpha * (lF)/S \quad (1.3)$$

Величину, обернену  $\alpha$ , і називають модулем Юнга:

$$\frac{1}{\alpha} = E \quad (1.4)$$

Відносна деформація:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha * \left(\frac{F}{S}\right) \quad (1.5)$$

Відношення розтягуючої сили  $F$  до  $S$  називають пружною напругою  $\sigma$ :

$$\varepsilon = \alpha * \sigma$$

Закон Гука, записаний з використанням модуля Юнга:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{\alpha} = E * \varepsilon \quad (1.6)$$

Фізичний зміст модуля Юнга: він відповідає напрузі, що викликається розтягуванням стержнеподібного зразка вдвічі, за умови збереження цілісності.

Коефіцієнт жорсткості при пружній деформації стрижня вздовж осі, має вигляд:

$$k = E * S/l \quad (1.7)$$

Модуль Юнга визначає величину потенційної енергії тіл або середовищ, що зазнали пружної деформації.[7]

Табл.1.1 Значення модуля пружності для деяких матеріалів

Матеріал	Модуль Юнга E, ГПа
Алюміній	70
Бронза	75-125
Вольфрам	350
Графен	1000
Латунь	95
Лід	3
Мідь	110
Свинець	18
Срібло	80
Сталь	200/210
Скло	70

### 1.3. Методи вимірювання деформації

Деформації вимірюються тензометрами, тензорезисторами, компараторами (деформації стиснення та розтягування) та зсувомірами (деформації зсуву).

Механічні тензометри - це прилади, в яких використаний принцип нерівноплечого важеля для збільшення невеликих деформацій верхнього шару елемента до

видимих неозброєним оком переміщень кінця стрілки. У практиці застосовують тензомерт Гугенбергера.

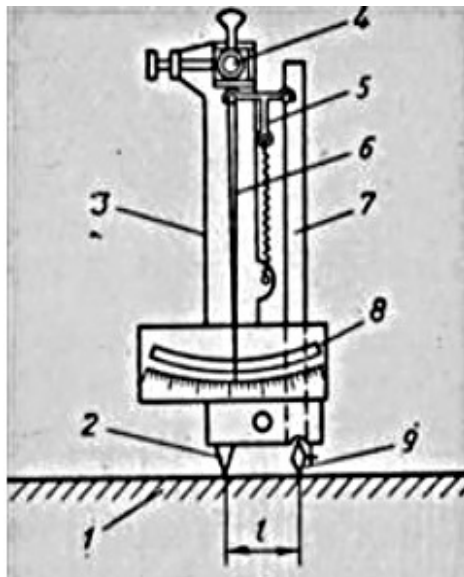


Рис.1.7. Схема тензометра Гугенбергера

Основними частинами є важільна система і шкала. На конструкцію 1, що випробовується, спираються нерухома призма 2 і рухлива призма 9, жорстко з'єднана з важелем 7. Горизонтальне «коромисло» 5 передає переміщення стрілки 6, прикріпленої до нерухомого важеля 3 на шарнірі 4. При деформації поверхневого волокна конструкції, що випробовується, на базі конструкції призми 9 і прикріплений до неї важіль 7 переміщуються відносно шарніра 4, внаслідок чого стрілка 6 показує збільшення довжини бази :

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta s}{s} \quad (1.6)$$

де  $\Delta s$  – різниця відліків на шкалі;  $\Delta l$  – збільшення приладу ;

ціна поділки шкали- 0.001 мм

Пристрій може змінюватися в межах 20-250 мм за допомогою спеціального подовжувача, що входить до комплекту приладу. На шкалі приладу розташоване дзеркало, яке служить для досягнення постійного положення ока спостерігача за різних відліків. При взятті відліку зображення стрілки у дзеркалі поєднується зі

стрілкою; при цьому погляд спостерігача постійно перпендикулярний до шкали приладу, що зменшує помилку при взятті відліку.

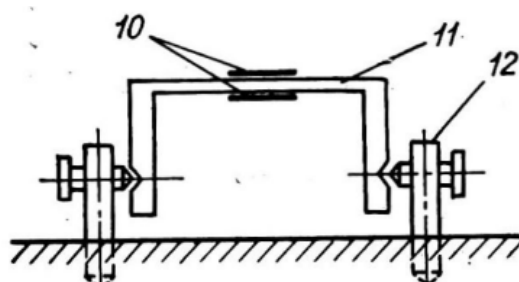


Рис.1.8. Електромеханічний тензометр

Дещо більш точний є електромеханічний тензометр, що являє собою пружний сталевий елемент 11, прикріплений до конструкції закладними деталями 12, що випробовується, і деформується спільно з нею. Деформації вимірюють за допомогою тензорезисторів 10.

Оптичні тензометри, призначені для вимірювання великих деформацій, засновані на базі фотоелектричних датчиків. В цьому випадку деформація перетвориться на електричний імпульс.

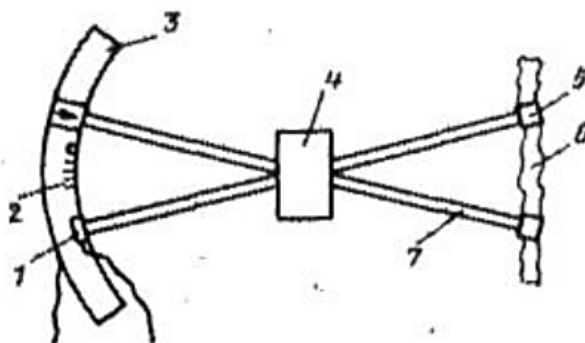


Рис.1.9. Схема оптичного тензометра з фотодіодами

Важелі 7, вісь обертання яких знаходиться в корпусі тензометра 4, закріплені на зразку 6 затисками 5. На одному з важелів закріплена зчитуюча голівка 1, в якій розміщені джерело світла і фотодіод, а на другому важелі - прозора шкала 3 з штрихами 2. Під час дії деформації об'єкта зчитуюча голівка переміщується вздовж шкали, а з фотодіода поступають імпульси (число яких пропорційно деформації) на вторинну апаратуру. Точність вимірювання залежить

від числа розподілів на шкалі і тому габарити такого пристрою мають бути більші, оскільки треба збільшувати розміри шкали і довжину важелів.

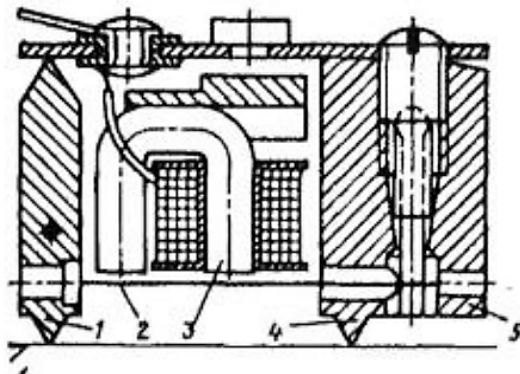


Рис.1.10. Струнний тензометр

1 - рухома призма; 2 - феромагнитна струна; 3 - електромагніт; 4 - нерухома призма; 5 - корпус.

Над струною встановлюється електромагніт для збудження коливань в струні при проходженні по його обмотці електричних імпульсів. Частоту коливань струни виміряють за рахунок сигналу, який знімається з обмотки електромагніту. Струнний тензометр являється частотним пристроєм. Для знімання значень зміни частоти, яка викликається деформаціями об'єкта, застосовують цифрові лічильники або частотні дискримінатори. Похибка вимірювання струнних тензометрів 1 о.в.д. Струнні тензометри використовують для вимірювання як статичних, так і динамічних деформацій, через їхню велику точність і різноманіття схем обробки частотно-модульованих сигналів.[8]

Найбільш точні дані про деформації можна отримати за допомогою електричних тензометрів, які дозволяють вимірювати деформації за допомогою електричних параметрів (омічний опір, ємність, індуктивність та ін.). У заснованих на цьому принципі електровимірювальні прилади розрізняють дві основні частини: тензометр, який деформується спільно з досліджуваним елементом конструкції і перетворює деформацію змінюваний електричний параметр; реєструюча установка, яка реєструє зміну електричного параметра, причому шкала установки відградуєвана в одиницях деформацій.

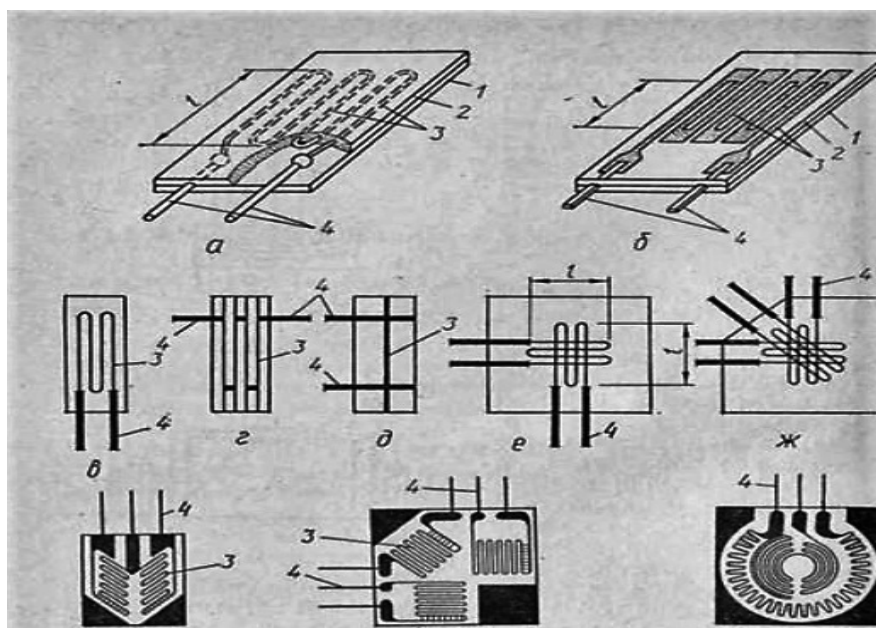


Рис.1.11. Типи тензорезисторів

а - дротяний; б - фольговий; в - ж - типи дротяних тензорезисторів (в - петльові; г, д - безпетлеві; е, ж - розетки); і - л - типи фольгових тензорезисторів; 1 - підкладка; 2 - основа; 3 - ґрати; 4 – виходи дротів

Поширені в практиці фольгові та дротяні тензорезистори являють собою зигзагоподібні ґрати з фольги товщиною 0,005-0,01 мм або з тонкого дроту діаметром 0,02-0,05 мм.

Дротова решітка наклеюється спеціальним клеєм на смужку тонкого паперу, (на основу). До кінця решітки припаюються виходи дротів, виготовлені з мідного дроту діаметром 0,15-0,3 мм або з фольги. Самі виходи міцно закріплюються на основі, щоб при натягу дротів, що припаюються до тензорезистора і йдуть до реєструючого приладу, тобто, щоб ґрати не працювали на додаткові зусилля. З метою запобігання можливим механічним впливам при наклеїці тензорезисторів на решітку зверху наклеюється перегінний папір.

Тензорезистори наклеюють спеціальними клеями (індивідуальними для кожного типу тензорезисторів) на підготовлену поверхню конструкції. При навантаженні конструкції, тензорезистор деформується спільно з поверхневим шаром конструкції (для забезпечення спільної деформованості наклеїтка повинна виконуватись з дотриманням ряду правил). При деформації тензорезистора змінюються довжина і площа поперечного перерізу дроту (фольги) та його

омічний опір (у межах тисячної частки Ома), що дає можливість заміряти змінну опору приладами, побудованими за вимірювальною мостовою схемою.

З метою усунення впливу температури на показання тензорезисторів в мостову вимірювальну схему вводять компенсаційні тензорезистори. Вони знаходяться в абсолютно ідентичних умовах у порівнянні з активними тензорезисторами, наклеєними на навантажувану конструкцію, але не піддаються силовим впливам.

Недоліком дротяних тензорезисторів є їх чутливість до поперечної деформації, так як невеликі ділянки дроту в місцях перегинів решітки розташовані в поперечному напрямку по відношенню до напрямку вимірюваних деформацій. Певну похибку в результаті вносить шар додаткового клею між решіткою і основою. Фольгові тензорні резистори позбавлені цих недоліків, оскільки поперечні перерізи фольги сильно потовщені.

Найбільш чутливими (але й найдорожчими) тензодатчиками є напівпровідникові тензодатчики, які являють собою тонку напівпровідникову пластинку з прикріпленими до неї дротами. Основною характеристикою тензорезистора є його тензочутливість, яка встановлює залежність між відносною зміною опору і деформацією в напрямку вимірювання.[8]

### **1.3.1. Коефіцієнт тензочутливості тензорезистора з відносною зміною опору та деформацією у напрямку вимірювання**

Величина коефіцієнта деформаційної чутливості залежить від матеріалу решітки. Як матеріал провідника для дротяних тензорезисторів використовують константан, ніхром, елінвар і адванс; для фольгових — переважно константан та ніхром, а при роботі тензорезисторів в агресивному середовищі — сплав титану; в якості чутливого елемента в напівпровідникових тензорезисторах використовується монокристалічний напівпровідник (зазвичай германій і кремній) товщиною 20-50 мкм, шириною до 0,5 мм, довжиною 2-12 мм. Коефіцієнт деформаційної чутливості для провідникових тензорезисторів становить 1,9-6, а напівпровідникових він залежить від наявності домішок і може досягати 200.

Поверхня для наклейки тензорезисторів готується наступним чином: металеву поверхню очищають від фарби та продуктів корозії за допомогою напилка, потім наждачним папером доводять ділянку наклейки до гладкої поверхні. Бетонну поверхню очищають від пилу та бруду, заповнюють усі раковини гіпсом, після висихання затверділого гіпсу ділянку наклейки знову зачищають шліфувальною шкіркою до отримання гладкої поверхні, що знежирюють ватним тампоном, змоченим в ацетоні або толуолі, промивають спиртом. Потім поверхню покривають тонким шаром клею, який добре висушують.

Рекомендації щодо склеювання тензорних резисторів залежать від типу тензорних резисторів, типу підкладки, типу клею, можливості створення зусилля, що притискає тензорезистор до конструкції в період приклеювання, можливості гарячого затвердіння клею (що зменшує його повзучість). Найкраща товщина клейового шва - до 0,2 мм, при цьому деформації поверхневого шару конструкції та тензорезистора рівні.

Якість проклеювання всієї поверхні тензорезистора дуже впливає на похибку вимірювань. За наявності непроклеєних місць (що буває, якщо після приклеювання тензорезистор не притиснутий до поверхні конструкції), деформація решітки тензорезистора відрізняється від деформації поверхневого шару елемента конструкції, і виникають додаткові похибки.

Велике значення має гідроізоляція тензорезисторів, особливо при випробуваннях натурних конструкцій, які проводяться без укриття цих конструкцій. Хороші результати дає ізоляція чистим вазеліном, воском (вони наносяться всередину рамки з водостійкого матеріалу, наклеєної навколо тензорезистора), карбінольно-цементною пастою (паста є також відмінним захистом від механічних пошкоджень). При наклейці тензорезисторів на арматуру, розташовану в бетоні, до бетонування найкращі результати дає ізоляція тензорезисторів поліетиленовою сорочкою, що виконується заливкою розплавленого поліетилену в роз'ємну форму. Для вимірювання деформацій в одному напрямку використовуються поодинокі тензорезистори. При



дослідженнях плоского напруженого стану застосовують розетки; є заздалегідь виготовлені тензорезистори, на одній основі яких нанесені фольгові тензорезистори, що складають розетку, в тому числі і компенсаційний тензорезистор.

Вимірювання деформацій проводиться приладами, побудованими за мостовою схемою.

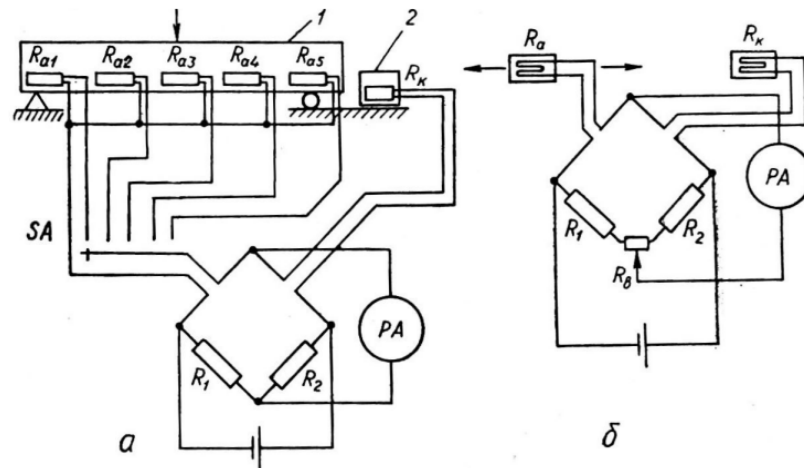


Рис1.12. Мостові схеми

а - з використанням методу відношень; б- нульовий метод;  $R_a$ -активний тензорезистор;  $R_K$  –термокомпенсаційний тензорезистор;  $R$  –реохорд;  $PA$  – амперметр;  $SA$  – перемикач; 1- випробувана конструкція; 2- бетонний куб

У зовнішні плечі моста включені активні тензорезистори з опором  $R_a$ , що безпосередньо сприймають деформації конструкції, і компенсаційний тензорезистор з опором  $R_K$ , розміщені в тих же умовах, що і активні тензорезистори в безпосередній близькості від них, але не схильний до деформацій. У внутрішні плечі моста включені тензорезистори з опорами  $R_1$  та  $R_2$ . Міст буде збалансований (тобто струм у його вимірювальній діагоналі дорівнюватиме нулю), якщо буде дотримуватися умова

$$R_a * R_1 = R_K * R_2$$

При використанні мостової схеми застосовують два методи вимірювань: метод відхилень, при якому зміна опору робочого (активного) тензорезистора визначається за силою струму, що виник у вимірювальній діагоналі спочатку збалансованого моста після його розбалансування при випробуваннях; нульовий

метод, коли відносні зміни опору  $\Delta R$  визначають балансуванням моста за допомогою реохорда, що ввімкнен в ланцюг.

Другий спосіб більш досконалий і частіше використовується для тестування. В даний час реєструючі прилади балансують міст автоматично.[9]

#### **1.4. Напруженість гірських порід**

Гірські породи в своєму природному середовищі перебувають під впливом сил різної природи. Залежно від місця їх прикладання ці сили можуть бути поверхневими і об'ємними. Поверхневі сили виникають поза досліджуваної області (блоку) земної кори і впливають на неї ззовні. Вони додаються до поверхонь (контактів) цих обмежувальних блоків. Об'ємні сили виникають всередині самих блоків. Вони впливають на кожен елементарний об'єм гірських порід. До поверхневих сил належать тектонічні сили, що виникають внаслідок накопичення пружної енергії в різних ділянках земної кори.

До об'ємних сил відноситься сила тяжіння, сили об'ємного стиснення внаслідок теплового розширення порід, змін об'єму при реакціях гідратації-дегідратації, поліморфних перетвореннях речовини тощо. Об'ємний стиск відбувається внаслідок обмеженої можливості розширення. Сили об'ємного розтягування виникають унаслідок зменшення обсягу порід, наприклад, при охолодженні інтрузій, що впровадилися. Поверхневі сили, зрештою, також розподіляються усередині порід унаслідок поширення пружних деформацій. При цьому інтенсивність їх вплив визначається не тільки їх величиною, а й обсягами блоків, на які вони впливають. Для об'ємних сил розмір блоків може мати зворотне значення. Вплив літостатичного тиску зростає з глибиною рахунок підсумовування ваги кожного з окремих обсягів порід. Тому для оцінки інтенсивності впливу сил на породи використовуються питомі характеристики – напруги, що являють собою внутрішні сили, що виникають у твердому тілі внаслідок деформування при силовому впливі на нього та прикладені до його елементарних (поодиноких) перерізів. Напруги - векторні величини, оскільки є похідними сил. Вони спрямовані проти сил зовнішнього впливу, у результаті досягається рівноважний стан порід. Однак для зручності у фізико-механічному

аналізі напруженого стану розглядаються протилежні їм у напрямку дії – зовнішні напруги, що діють на ті ж елементарні перерізи у зворотному напрямку. Величина напруги на елементарній площі визначається силою  $dF$ , що діє на неї:

$$p = dF/dS$$

Середня напруга по площі поперечного перерізу  $S$ , на яку діє сила  $F$ , дорівнює відношенню  $F/S$ . Тому розмірність напруг відповідає розмірності тиску – Паскаль (Па) у системі СІ. Через загалом велику величину напружень, що виникають у геологічних процесах, зазвичай використовуються більші одиниці напруги - мегапаскаль (1МПа =  $10^6$  Па) та гігапаскаль (1ГПа =  $10^9$  Па).

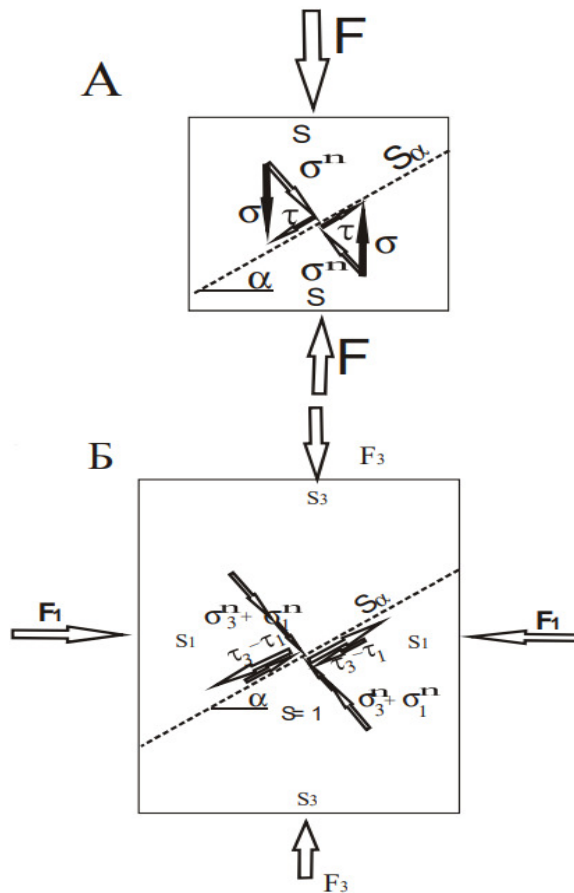


Рис.1.13. Співвідношення напруги у косому перерізі блоку порід: А – при одновісному навантаженні; Б - в умовах плоского або об'ємного напруженого стану стиснення (при  $F_1/S_1 < F_2/S_2 < F_3/S_3$ )

Величина результуючих напруг у будь-якій точці твердого тіла визначається їхньою векторною сумою. Якщо між вектором напруги та площею

кут  $\alpha < 90^\circ$ , то на ній виникають дві складові загальної напруги. Одна з них – нормальна напруга, яка діє перпендикулярно до площі. Вона може бути стискаючою, коли направлена до площі, або розтягуючою, якщо направлено від неї. Нормальні напруги позначаються символом  $\sigma$ . Складова загальної напруги, що діє вздовж поверхні площі – тобто дотична або зсувна напруга ( $\tau$ ). Для визначення величин цих напруг у будь-якому похилому перерізі є два види напруженого стану.[10]

Перший – одновісний напружений стан, який виникне, якщо блок порід стискається силами  $F$  перпендикулярно двом його протилежним граням (площею  $S$ ). Усередині цього блоку на всіх перерізах, паралельних цим граням, виникне нормальна напруга:  $\sigma = F/S$ , а дотична напруга буде відсутня. На похилому перерізі величини напруги будуть іншими. Їх значення визначаються кутом нахилу  $\alpha$ , від якого залежать розміри цього похилої площі ( $S_\alpha = S / \cos \alpha$ ) і також нормального або дотичного по відношенню до цього перерізу проекціями сили:  $F^n = F * \cos \alpha$ ,  $F^t = F * \sin \alpha$ ,  $\sigma_\alpha = \sigma * \cos^2 \alpha$ ,  $\tau_\alpha = \sigma * \cos \alpha * \sin \alpha = \left(\frac{\sigma}{2}\right) * \sin 2\alpha$ .

Тобто, впливає, що на площах перпендикулярних або паралельних до напрямку вектора сили  $F$ , що стосуються напруги дорівнюють 0. Вони максимальні і дорівнюють  $\tau_{max} = \sigma/2$ - на похилих площах при  $\alpha = 45^\circ$ . Нормальна напруга зменшуватиметься від величини  $\sigma$  до 0 зі збільшенням нахилу площ від 0 до  $90^\circ$ , тобто паралельно до зовнішньої сили  $F$ .

У разі дії двох стискаючих сил ( $F_1$  і  $F_2$ ), кожна з яких прикладена перпендикулярно до однієї з двох пар паралельних граней площею  $S$ , на похилій площі  $S_\alpha$  відбудеться суперпозиція напруг, що виникли від дії обох сил (рис.1.13.б):

$$\sigma_\alpha = \sigma_1^n + \sigma_2^n = \sigma_1 * \cos^2 \alpha + \sigma_2 * \sin^2 \alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + [(\sigma_1 - \sigma_2)/2] * \cos 2\alpha;$$

$$\tau_\alpha = (\sigma_1/2) * \sin 2\alpha - (\sigma_2/2) * \sin (2\alpha - 180) = [(\sigma_1 - \sigma_2)/2] * \sin 2\alpha.$$

Внутрішня напруга поперечного розтягування створюється за рахунок дії частинок породи, що розклинюють, прагнуть зайняти місце між сусідніми частинками нижче і також за рахунок вигину зовнішніх частин зразка з його центру.

Ця дія не стримується тертям граней зразка під плитами преса. У крихких породах у своїй виникають тріщини відриву, і відповідає другий механізм їх утворення – внаслідок бічного розтягування без додаткового зовнішнього розтягування. Проявляється саме при утворенні будинажу, коли у зонах зминання шари крихких порід піддаються стиску майже перпендикулярно шаруватості, а площини контактів не стримуються тертям від зміщення серед пластичних порід. Розтягуючі зусилля вздовж контактів додатково посилюються внаслідок течії пластичних верств, так як величина їх поперечної деформації значно вища, ніж у крихких порід.

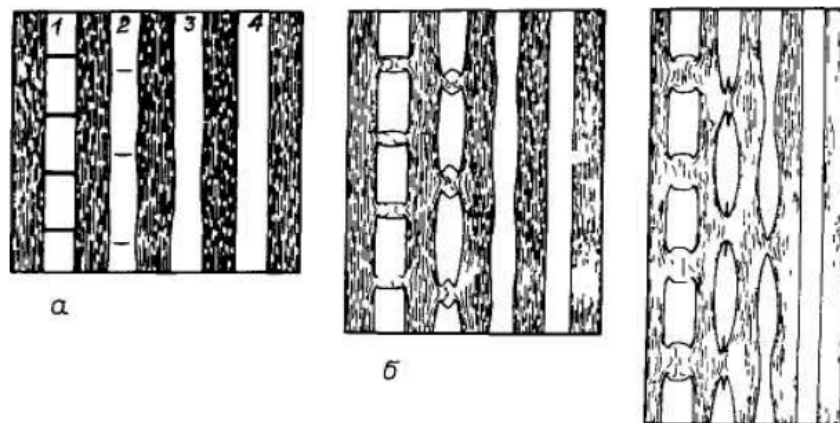


Рис.1.14. Співвідношення між розтягуванням шарів та контрастом їх пластичності щодо матриксу (деформація росте зліва направо)

У зразках циліндричної форми під дією радіального розтягування в умовах осьового стиску виникають циліндричні тріщини відриву. У геологічних умовах такі тріщини утворюються при дії вертикального стиснення - при впровадженні ізометричних у плані інтрузивів на невеликій глибині або над блоками порід, що піднімаються, соляними куполами і т.д. Оскільки бічне стиснення невелике, можна з певною умовністю вважати поле напружень у цих структурах активною складовою напружень, тобто, ближче до одновісного скорочення.

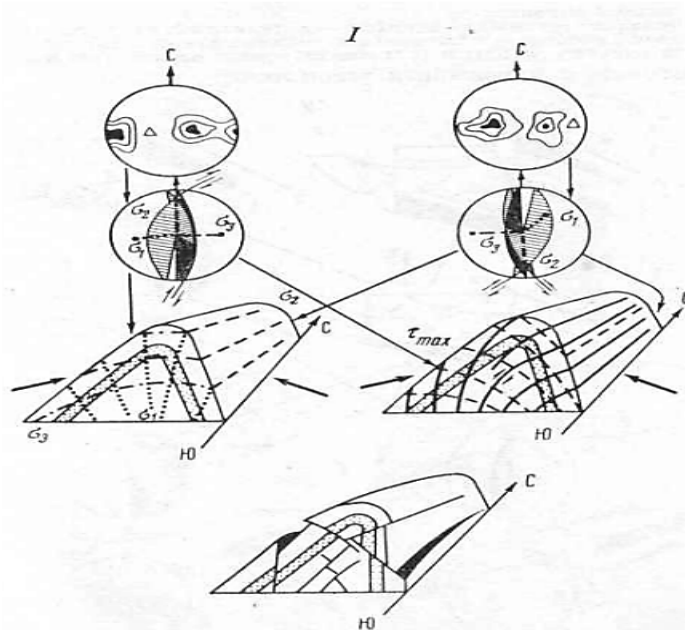


Рис.1.15. Напружений стан та структурний парагенезис складок поздовжнього вигину

У циліндричних зразках або навколо точок прикладання ударного стиснення (наприклад, потрапляння кулі в товсте скло) виникають конусоподібні сколові тріщини з вертикальною віссю симетрії паралельного стиску. Бічне стиснення тут також досить велике, і напружений стан вже є об'ємним. У геологічних умовах такі тріщини (і розривні розломи) виникають над місцями вибухових деформацій на глибині (багато вулcano-плутонічні кільцеві структури). Надалі вони відкриваються при наступних просіданнях над виснаженим магматичним вогнищем і можуть вміщувати конічні дайки. У високопластичних шарах, а також при стисненні в умовах підвищених температур і насичення гірських порід флюїдами тріщини можуть відхилитися від напрямку стиснення на кути суттєво більші  $45^\circ$ . Однак зазвичай в таких умовах формується кліваж течії і дрібна тріщинуватість сплющування, пов'язана з неоднорідним субпластичним диференційованим перебігом порід площинах перпендикулярних стиску. Але, якщо виникне об'ємний напружений стан, то на кожному з трьох пар граней елементарного кубічного об'єму будуть діяти нормальні стискаючі напруги а на трьох парах поєднаних похилих площин ( $\alpha \approx 45^\circ$ ) діють дотичні напруги:

$$\tau_{(1-3)} = \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)}{2}; \tau_{(1-2)} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2}; \tau_{(2-3)} = \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{2}$$

Максимальна дотична напруга виникає на сполучених площах, розташованих під кутами близько  $45^\circ$  до найбільшого стиснення  $\sigma_3$ .

За рівності всіх нормальних напруг виникне стан всебічного рівномірного стиснення. При цьому дотичні напруження на будь-яких похилих площах зникнуть.[10]

### 1.4.1. Поле напруг

Гірські породи земної кори знаходяться під впливом сил різної природи, що виникають внаслідок літостатичного навантаження, тектонічних, тектономагматичних, метаморфічних процесів, діагенетичних перетворень та інших факторів. Дія цих сил призводить до виникнення різних за типом, масштабами та інтенсивністю полів напружень (наприклад, горизонтального зсуву або розтягування, поздовжнього або поперечного стиску) і виникають різні геологічні структури (складки, розривні порушення різних типів і масштабів і т.д.).

Тобто, поле напруг розуміється як сукупність напруг, що діють спільно у певному обсязі твердого тіла. Для повної характеристики поля напружень у різних точках досліджуваного об'єму порід необхідно встановити складові тензора напружень. Зазвичай розглядають абсолютні значення і знаки головних нормальних і максимальних дотичних напружень і їх орієнтацію в просторі. Позитивними вважаються розтягувальні, негативними – стискаючі напруги. За величинами головних нормальних напруг та їх орієнтування можна визначити величину та орієнтування максимальної дотичної напруги. Зазвичай приймається, що кожна точка, для якої встановлені компоненти тензора напруги, характеризує деякий блок, в якому поле напруги у всьому його обсязі не змінюється.

Найважливішими є ті типи полів напруг, що характеризуються певними співвідношеннями напруг стиску і розтягу, тобто тип напруженого стану, а також орієнтація головних нормальних осей напружень. У земній корі можуть

поєднуватися різні типи полів напружень. Одні й ті ж типи полів напружень можуть відрізнятися величинами складових тензора напружень і часом дії. Це може призвести до появи однотипних деформацій, але їх величина буде різною.

Деякий структурний парагенез природно пов'язаний з кожним типом поля напруги. У масштабі родовищ і рудних полів зазвичай розглядається локальний структурний або механічний структурний парагенезис (МСП), який являє собою сукупність складчастих структур і розломів, близьких за масштабом, природно орієнтованих на об'єм породи і сформованих як єдине ціле. період часу в загальному полі напруги. [11]



## 2. ЛАЗЕРНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Лазерні методи мають переваги перед іншими методами завдяки тому, що не впливають на об'єкт вимірювання (це безконтактні методи), та забезпечують високу точність вимірювання. Ці методи застосовуються для вимірювання наступних величин: амплітуди, швидкості, та прискорення вібрації, кутову швидкість обертання, відстаней, розмірів, швидкості потоків рідини та газів, дисперсного складу мікрозабруднень, та ін. Розглянемо принцип дії деяких лазерних вимірювальних приладів:

### 2.1. Лазерний вимірювач параметрів вібрації

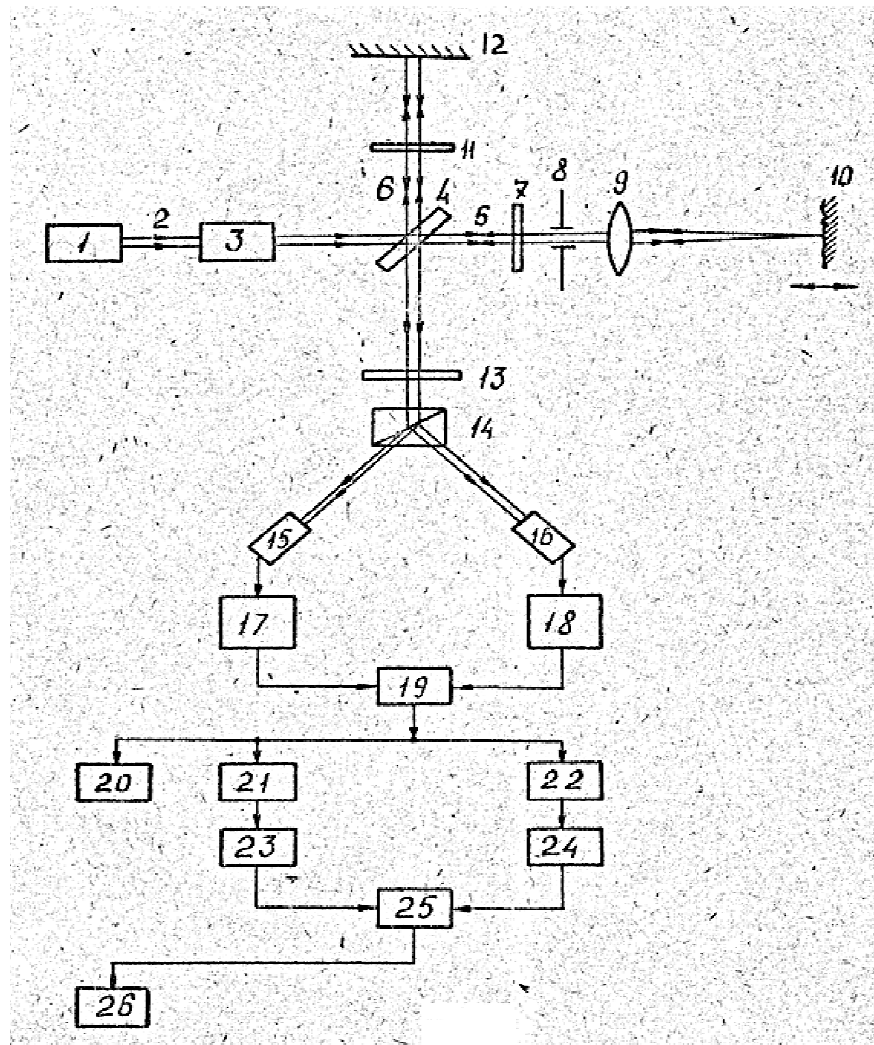


Рис. 2. Блок-схема лазерного пристрою

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат.	ЛАЗЕРНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН		
Розроб.		Савранський В.А.			Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дивнич М.П.				33	109
Реценз.					ФАЕТ- 214 гр.		
Н. Контр.		Дивнич М.П.					
Затверд.		Мельник Ю.В.					

Розглянемо вимірювач вібрації, функціональна схема якого представлена на (рис.2.1.), такий прилад працює наступним чином: лазер випромінює лінійно поляризаційний промінь 2 з частотою  $W_0$ , який надходить на вхід лінійного обертача площини поляризації 3, за допомогою якого площина поляризації променя 2 обертається з постійною кутовою швидкістю  $\Omega$ . Промінь (2) потім розділяється світлороздільником 4 на два промені: випромінюючий промінь 5 і опорний промінь 6.

Випромінюючий промінь 5 за допомогою чвертьхвильової пластини 7 буде перетворюватися на випромінювання, дві складові якого мають взаємно ортогональні лінійні стани поляризації в горизонтальній і вертикальній площинах, з частотами:  $(W_0 * \Omega ; W_0 - \Omega)$ . І вже, промінь 5 фокусується лінзою 9 в локальну зону дифузно-розсіюючого предмета 10, який коливається вздовж оптичної осі лінзи за гармонійним законом:  $A = A_{om} * \sin(\omega t)$ . Під кутом розсіювання  $180^\circ$ , коливальне випромінювання, розсіяне лінзою, модульоване за частотою в результаті ефекту Доплера, збирається у об'єктиві (в межах кута, що обмежений діафрагмою 8), та прямує на платівку 7. Після цього, за допомогою чвертьхвильової пластинки 7 лінійно поляризоване розсіяне випромінювання, що має доплерівський зсув частоти, перетворюється у випромінювання з двома взаємно ортогональними поляризованими компонентами з частотами:  $W_0 - \Omega + Wg(t)$  і  $W_0 + \Omega + Wg(t)$ . Потім розсіяне випромінювання, відбившись від світлоділяника 4, за допомогою чверть хвильової пластинки 13 і діафрагми Волластона 14 перетвориться в два просторово розділених променя, один з яких, що має горизонтальну поляризацію та частоту:  $W_0 \Omega Wg(t)$ , спрямовується на приймач 15, а промінь вже, який має вертикальну лінійну поляризацію та частоту  $(W_0 - \Omega + Wg(t))$ , до фотоприймача.

Одночасно проходячи через нейтральний світлофільтр 2 і відбиваючись від дзеркала 12, промінь прямує до інтерферометра, за допомогою чвертьхвильової пластини 13 і призми Волластона 14 пучок 6 розбивається на два просторово розділених пучка, один з яких лінійно поляризований в горизонтальній площині,

інший- має частоту, що направляється на фотоприймач 15, а другий промінь лінійно поляризується у вертикальній площині з частотою  $(W_0 - \Omega)$  на фотоприймачі 16.

Після використання методу вимірювання частот(оптичне гетеродинування), на виході фотоприймача 15 формується змінна складова сигналу, відповідно на новій частоті  $(2\Omega + W_g(t))$ , а на виході фотоприймача 16 змінна складова фотоструму дорівнює йому по амплітуді на  $(2\Omega - W_g(t))$ .

Сигнали з виходів фотоприймачів 15 і 16 надходять на входи частотних дискримінаторів 17 і 18, налаштованих на несучу частоту. Виходивид частотних дискримінаторів підключені до входів диференційного підсилювача, який у свою чергу, здійснює різницю вихідних сигналів частотних дискримінаторів.

Так як корисні сигнали, що несуть інформацію про коливальний об'єкт 10, на виході частотних дискримінаторів 17 і 18 мають однакову амплітуду і частоту, але знаходяться в протифазі, то вже після віднімання їх на виході диференційного підсилювача відбудеться корисний сигнал (що буде в 2 рази більший), при тому буде одночасне зменшення шумів, що сфазовані між собою на виходах дискримінаторів 17 та 18 (рис.2.1.).

Можна дійти до висновку, що відбувається підвищення чутливості і опору вимірювального контуру, а змінний сигнал на виході диференціального підсилювача 19 має частоту коливань, що дорівнює частоті коливань, і амплітуду, пропорційну амплітуді і частоті коливань(вібрації). Вихід диференціального підсилювача, який з'єднаний з частотним детектором 21, та на виході якого формується сигнал з напругою, пропорційний частоті вібрації. Цей сигнал подається на перший вхід вимірювача коефіцієнта напруги через масштабуючий перетворювач 23. Другий вхід диференціального підсилювача з'єднаний з входом пікового детектора 22, на виході якого формується сигнал, відповідно напруга якого пропорційна на амплітуду і частоту вібрації. Потім сигнал з виходу пікового детектора через інший масштабуючий перетворювач 24, надходить на другий

вихід вимірювача співвідношення напруг 25. Вихід вимірювача співвідношення напруг з'єднаний з цифровим вольтметром 26, за допомогою якого вимірюється амплітуда коливань. Частота вібрації вимірюється цифровим частотоміром 20, тобто підключеним до виходу диференціального підсилювача 19.

На основі принципу дії, даний пристрій має підвищену чутливість, завадостійкість, точність вимірювання і частоти коливань дифузійно-розсіюючої коливальної поверхні. Збільшення чутливості та захищеності в два рази пов'язано з тим, що в пропонованій схемі використовується двоканальна схема прийому розсіяного випромінювання. А тому, підвищення точності вимірювання амплітуди та частоти коливань забезпечується додатково встановленими аналоговими вимірювальними перетворювачами, які насамперед забезпечують визначення амплітуди і частоти вібрації в реальному масштабі часу.[12]

## **2.2. Лазерні висотоміри та далекоміри**

Основна мета висотоміра зводиться до вимірювання відстані до об'єктів (площі, над якою пролітає літак). Але так як, далекоміри засновані на тих принципах, що й лазерні висотоміри, існують наступні типи далекомірів:

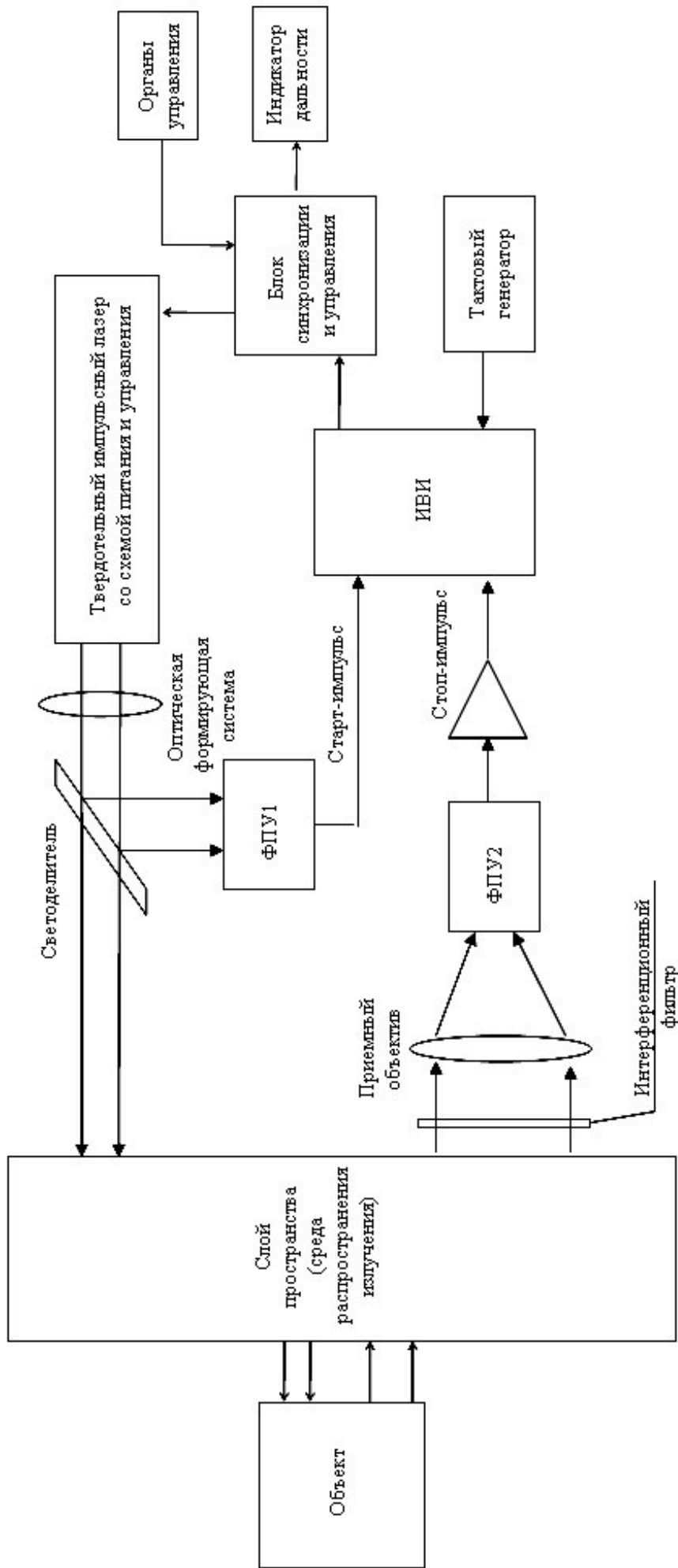
- активні далекоміри—використовуються в процесі вимірювання дальності підсвічування об'єкта за допомогою випромінювання лазера або світлодіода;
- пасивні далекоміри—принцип дії яких заснований на триангуляційному (параллаксному) методі

Пасивні далекоміри широко використовувалися у фототехніці, але не забезпечували високої точності чи великої дальності. Тому, з цієї причини пасивні далекоміри широко не використовуються. У свою чергу активні далекоміри функціонально діляться на такі типи:

- лазерні імпульсні далекоміри, які визначають дальність за часом поширення лазерного імпульсу до об'єкта і навпаки;

- лазерні фазові далекоміри, які вимірюють дальність шляхом визначення фазового зсуву гармонічно модульованого оптичного випромінювання лазера або світлодіода по відношенню до опорного коливання;
- інтерференційні лазерні далекоміри, де принцип дії заснований на підрахунку інтерференційних смуг при переміщенні реперного світлоповертального елемента від початкового до необхідного положення.

Такий тип далекомірів має обмежену область застосування, так як потрібна необхідність використання репера, а також мала вимірювана дальність, хоча і володіють дуже високою точністю (більше 1 мкм). Також такого типу далекоміри використовують при високоточному технологічному контролі різних об'єктів. Інтерференційні далекоміри широко не розглядатимуться.



Функциональная схема лазерного импульсного дальекомира

Рис. 2.2.

Таким чином, найбільш поширені в різних областях діяльності людини є саме далекоміри двох класичних типів - імпульсні і фазові.[13]

### **2.2.1. Лазерні імпульсні висотоміри та далекоміри**

Принцип дії таких лазерних імпульсних далекомірів (рис.2.2) заснований на вимірюванні інтервалу часу між моментом випромінювання зондуєчого моноімпульсу лазера (стартовий імпульс) і моментом прийому відбитого від об'єкта випромінювання (кінцевого імпульсу). Джерелом випромінювання в таких пристроях є імпульсний лазер (як правило, твердотільний або напівпровідниковий), випромінювання якого колібується за допомогою оптичної формувальної системи. Під час формування лазерного імпульсу, частина лазерного випромінювання відхиляється (зазвичай, за допомогою світлороздільника), до фотоприймального пристрою ФПП1.

Потім, відбите від об'єкта випромінювання, потрапляє в приймальний канал, що складається з приймальної лінзи, ФПП2 (приймач випромінювання) і підсилювач сигналу. Вимірювач часових інтервалів (ВЧІ) починає працювати в момент випромінювання лазерного імпульсу за сигналом ФПП1 і припиняє його в момент прийому відбитого випромінювання за сигналом ФПП2, видаючи цифровий код отриманого результату. Блок синхронізації та керування інтерпретує та підвищує точність отриманих результатів, формує індикаторний сигнал, а також приймає команди від органів керування.

Коли відома постійна швидкість поширення електромагнітного випромінювання в шарі середовища (атмосфері), дальність до об'єкта розраховують за допомогою наступного виразу(враховують, що лазерне випромінювання проходить подвійну відстань, в 2 рази швидше):

$$L = \frac{c\Delta t}{2n}, \quad (2.1)$$

де  $c$  - швидкість світла у вакуумі;  $\Delta t$  - інтервал часу між моментами посилання і прийому випромінювання зондуєчого імпульсу;  $n$  - показник

заломлення середовища розповсюдження для використовуваної довжини хвилі випромінювання

З виразу (2.1.) слідує, щоб зменшити похибку вимірювання відстані до об'єкта, необхідно забезпечити постійність швидкості поширення випромінювання в шарі середовища та його прямолінійність. Ці умови не завжди виконуються: наприклад, при розміщенні далекоміра на літаку і скануванні ним об'єктів на Землі, необхідно враховувати явище заломлення, яке і призводить до спотворення оптичного шляху лазерного випромінювання. Або, при локалізації лазера в турбулентному середовищі, оптичний шлях лазерного випромінювання також спотворюється (що відрізняється від прямолінійного).

Основний внесок у похибку вимірювання відстані до об'єкта вносять похибки, що виникають при вимірюванні інтервалу часу між моментами відправки та прийому випромінювання зондуєчого імпульсу. Серед них можна виділити:

- систематичну похибку, що обумовлена різним часом затримки сигналу в каналах фіксації випромінюваного (старт) і прийнятого (стоп) імпульсів;
- похибка, яка викликана кінцевою дискретністю лічильника інтервалу часу;
- похибка фіксації імпульсів випромінювання у часі.

Так як затримка сигналу буде різною в каналах випромінюваного (старт) і прийнятого (стоп) імпульсів, то буде виникати систематична похибка, тоді можна її або мінімізувати, чи внаслідок поведінки її характеру, врахувати при вимірюванні тимчасового інтервалу. Мінімізація такої похибки можлива за допомогою схемної компенсації, або при комбінованій схемі пуску, коли на один приймач випромінювання подаються імпульси запуску і зупинки, та вона повністю компенсується. У системах без комбінованого пуску ця системна помилка може бути врахована шляхом повторного вимірювання калібрувальної відстані. Вимірювач часових інтервалів, коли його внутрішня тактова частота не синхронізована з часом випромінювання зондуєчого імпульсу, вплив дискретності можна оцінити за дисперсією відповідної похибки:  $D = \frac{\Delta d^2}{6}$ , де  $\Delta d$ - дискретність вимірювання інтервалів часу в одиницях відстані. При використанні



тактового генератора для вимірювача інтервалів часу з частотою від 150 до 300 МГц похибка, викликана дискретністю, складе 0,1-0,2 м.

В основному, похибка фіксації імпульсів випромінювання в часі, пов'язана з прийомом відбитого від об'єкта лазерного імпульсу - потужність сигналу може змінюватися на кілька порядків залежно від відстані до об'єкта та його коефіцієнта відбиття, стан шару середовища розповсюдження випромінювання. Крім цього, на сигнал також будуть накладатися шуми та перешкоди каналу прийому та каналу розповсюдження. Все це призводить до сильних спотворень форми прийнятого сигналу і, як наслідок, до похибки, при фіксації моменту приходу цього імпульсу від обмежувального пристрою.

Найпоширенішим способом синхронізації отриманого імпульсу випромінювання є його фіксація за рівнем обмежувального пристрою (наприклад, високошвидкісного компаратора). Тоді, в такому випадку час приходу імпульсу випромінювання фіксується при перетині порогу спрацьовування, і залежить як від тривалості фронту імпульсу, а також від усіх параметрів властивостей об'єкта, (стану атмосфери), які деформують форму сигналу.

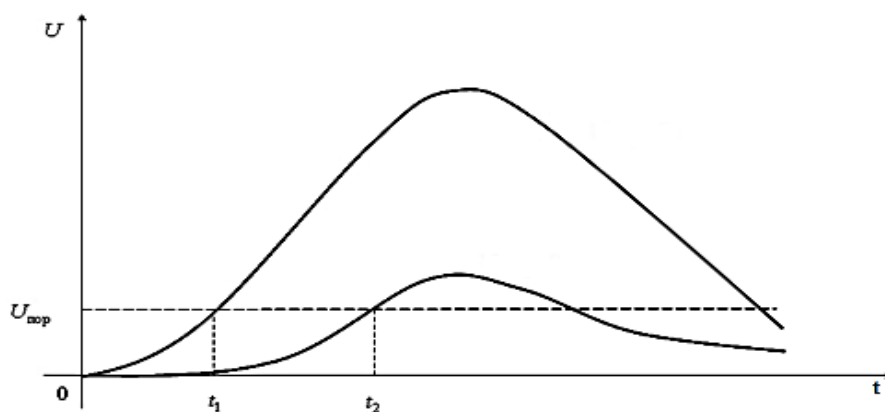


Рис.2.3. Часова фіксація імпульсів за рівнем

Коли форма сигналу зберігається, розкид моменту замикання дорівнює тривалості фронту імпульсу, тому джерело лазера в високоточних далекомірах підпорядковується мінімальній тривалості імпульсу і максимізації добротності. Імпульсні лазери частіше використовують з тривалістю імпульсу 10 нс і менше.

Методи фіксації максимуму імпульсу і точки перетину нуля похідної застосовують лише тоді, коли вимоги до точності фіксації імпульсу є дуже високі.

Такі методи порівняно прості у реалізації та забезпечують високу точність фіксації, проте вони ефективні лише в лінійній області зміни сигналу, як правило, в динамічному діапазоні амплітуд, що не перевищують ста. Як було сказано, лазерні методи далекомірів засновані на визначенні часу, протягом якого імпульсний сигнал буде проходити подвоєну відстань від далекоміра до відбивача. А тому, лазерні далекоміри повинні вимірювати відстані від часток метра до десятків кілометрів, що відповідає інтервалу часу вимірювання від наносекунд до мілісекунд. Час вимірювання лазерними далекомірами постійний і визначається вже самим оператором. Це полегшує отримання задовільного постійного розширення та знижує вимоги до ВЧІ.

Якщо казати про розширення ВЧІ, то воно має бути вище, ніж вся далекомірна система в цілому, що визначається рівнем як шумів, так і часом вимірювання. Саме розширення, можна покращити шляхом усереднення, що, у свою чергу, збільшує час вимірювання.

Важливими параметрами вимірювання інтервалу часу - лінійність і стабільність. Лінійність разом з флуктуаційною похибкою пристрою синхронізації визначає абсолютну точність лазерного далекоміра. Стабільність лазерного далекоміра визначається не тільки дрейфом ВЧІ, хоча він є одним з основних джерел похибок. Загалом, стабільність ВЧІ не є важливою для точних вимірювань, так як лазерний далекомір час від часу калібрується під час самого процесу вимірювання.

### **2.2.2. Лазерні фазові висотоміри та далекоміри**

Такі прилади, на відміну від імпульсних, мають значно менший діапазон вимірювань, але при цьому значно вищу точність вимірювань. Такі відмінності пояснюються тим, що в якості джерела випромінювання в лазерних фазових висотомірах використовується безперервний напівпровідниковий лазер або світлодіод, випромінювання якого модулюється одним або кількома гармонійними сигналами.

У цих пристроях, відстань визначається шляхом порівняння фази модульованого сигналу на виході приймача випромінювання (фаза

випромінювання, яке пройшло шлях до об'єкта і назад) з фазою опорного сигналу(фаза сигналу на джерелі випромінювання). І, відповідно, відстань, через яку світлова хвиля поширюється в часі:  $l = ct$ , де  $c$  - швидкість світла.

При цьому фаза модульованого лазерного випромінювання, що проходить від джерела висотоміра до об'єкта і навпаки, зміниться на:

$$\varphi = 2\pi f_m t, \quad (2.2)$$

де  $f_m$  - частота модуляції випромінювання

З виразів (2.2) і (2.3), відстань до об'єкту можна визначають:

$$l = c \frac{\varphi}{2\pi f_m}, \quad (2.3)$$

При вимірюванні фази виникне похибка  $\Delta\varphi$ . Відповідна похибка вимірювання відстані  $\Delta l$  становитиме:

$$\Delta l = c \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m}. \quad (2.4)$$

Зробивши аналіз формули (2.4) можна дійти до висновку, що похибка вимірювання дальності  $\Delta l$  тим менша, чим вище частота модуляції, але для однозначного визначення дальності зміна фази  $\varphi$  вимірюваної відстані, повинна бути тим менше  $2\pi$ , тобто подвійна відстань не повинна перевищити довжину хвилі модуляції. На максимально допустиме значення частоти модуляції, буде накладитися обмеження. Як правило, висотоміри використовують не одну, а декілька частот модуляції. Низька частота буде визначатися максимальним діапазоном вимірювання, наступними частотами - похибка вимірювання на попередній частоті (подібно до низької частоти, необхідна умова, щоб похибка на нижній частоті не перевищувала довжину хвилі модуляції вже наступної частоти). Кінцева частота модуляції визначається необхідною похибкою і точністю вимірювання рівняння (2.4). У висотомірах, частіше використовується вбудований фазовий детектор, який вимірює різницю фаз між вхідним і еталонним сигналами від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  (неоднозначність виникає у великому діапазоні фаз).

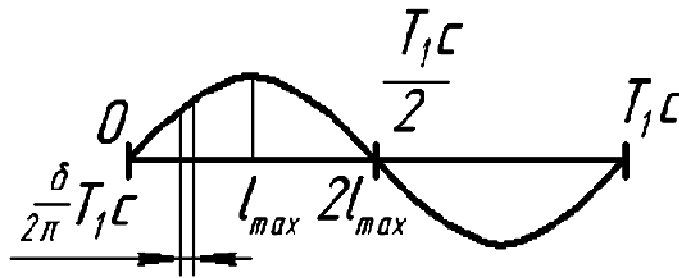


Рис.2.4. Схематичне зображення періоду модулюючого випромінювання та його співвідношення з вимірюваним діапазоном

В цьому випадку необхідно, щоб при проходженні випромінюванням відстані до об'єкта і назад фаза змінювалася на величину, що не перевищує, тобто відстань до об'єкта подвоювалася відповідно до половини довжини хвилі модулюючої частоти. У цьому випадку максимальний діапазон визначається за допомогою виразу:

—

де  $T_1$  - період модуляції випромінювання на першій частоті.

Перша частота модуляції повинна бути:

—

Як правило, для фазових детекторів похибка вимірювання фази за допомогою аналогових інтегральних фазометрів становить  $0,5^\circ \dots 1,0^\circ$ .

Якщо похибка значно перевищує необхідну, потрібно використовувати іншу, більш високу частоту модуляції. Для чіткого визначення відстані необхідно, щоб похибка на першій частоті модуляції не перевищувала половину довжини хвилі другої частоти модуляції, тобто щоб виконувалася умова:

—

де  $T_2$  - період модуляції випромінювання на другій частоті.

На частоті  $f_{2m}$  похибка вимірювання відстані буде складати:

—

Оскільки вихідне значення становить половину вимірної відстані, його похибка також у 2 рази стане менша. В такому випадку вона буде  $\Delta l_2/2$ . При вимірюванні на частотах  $f_{1м}$  і  $f_{2м}$  буде отримано значення фазового зсуву  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ .

Відстань до об'єкта і назад відповідає  $N$  цілим довжинам хвиль високочастотної модуляції і деякій дробовій частині:

$$l = N \frac{c}{f_{2м}} + \frac{c\varphi_2}{2\pi f_{2м}}$$

де  $N$  знаходять, як ціла частину від виразу:

$$\frac{f_{2м}}{4\pi} \left( \frac{2\varphi_1}{f_{1м}} - \frac{\varphi_2}{f_{2м}} \right)$$

Недоліком такого принципу побудови висотоміра є висока частота модуляції сигналу  $f_{2м}$ . Крім того, при великій відстані до об'єкта зондування і при високій точності вимірювань (на рівні 1 ... 5 мм) можуть знадобитися три і більше частоти модуляції.[13]

#### 2.4. Лазерний прилад для визначення дисперсного складу мікрозабруднень авіаційного палива

Відомо, що забруднення зростає зі збільшенням інтенсивності розсіяної випромінювання. Тому, така залежність неоднозначно співвідносить діаметр аерозолі з вихідним сигналом фотодетектора. Частинки з різним діаметром можуть відповідати однаковій інтенсивності розсіювання випромінювання.

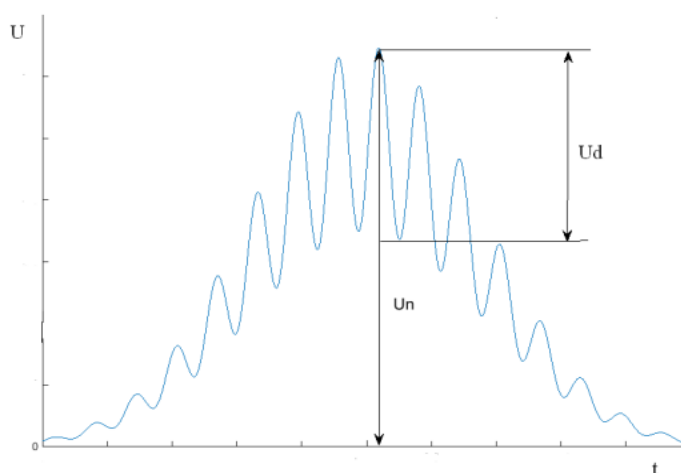


Рис.2.5. Сигнал лазерного доплерівського лічильника частинок

Відомо також, що змінна (доплерівська) складова сигналу лазерного доплерівського вимірювання швидкості для заданого розміру частинок дорівнює

нулю, а постійна складова сигналу (що визначається інтенсивністю розсіюючого випромінювання) приймає певне значення.

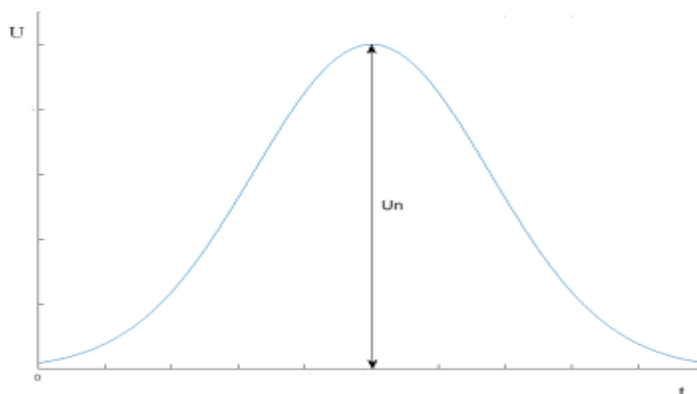


Рис. 2.6. Постійна складова сигналу лазерного доплерівського лічильника частинок.

Коефіцієнт глибини модуляції доплерівського сигналу дорівнює нулю, а тому, коефіцієнт глибини модуляції доплерівського сигналу визначається як відношення амплітуди змінної складової доплерівського сигналу  $U_d$ , до амплітуди постійної складової:  $V = \frac{U_d}{U_n}$

Для певного набору діаметрів частинок, де коефіцієнт глибини модуляції доплерівського сигналу дорівнює нулю, існує чітка залежність між діаметром аерозолі та амплітудою постійної складової доплерівського сигналу.

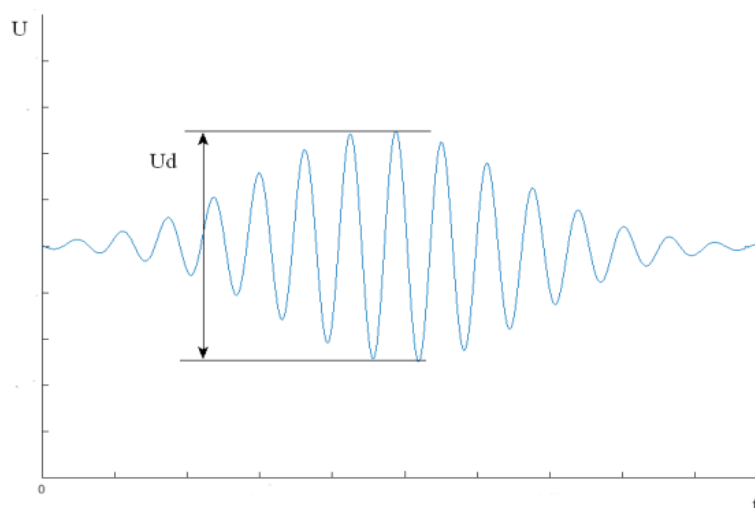


Рис.2.7. Змінна складова лазерного доплерівського лічильника частинок

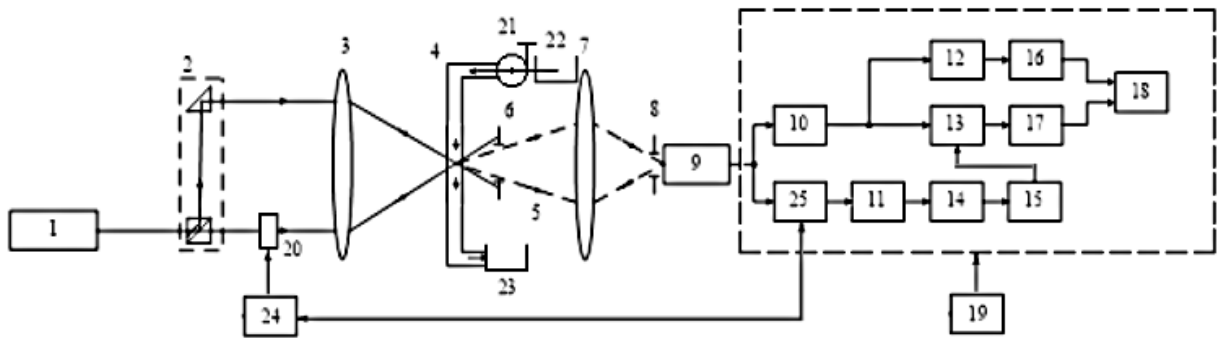


Рис. 2.8. Схема лазерного доплерівського лічильника частинок

У даному лазерному доплерівському лічильнику визначаються частинки з певними значеннями діаметра. Потім вимірюється амплітуда постійної складової доплерівського сигналу та визначення відповідності амплітуди сигналу діаметру забруднюючої частинки.[14]

Такий лазерний лічильник частинок побудований на основі диференціальної схеми лазерного доплерівського вимірювача швидкості. Лазерне випромінювання 1 розділяється дільником(розщеплювач) 2 на два промені, які за допомогою фокусуєної лінзи 3 спрямовуються в зону вимірювання. Оптичний затвор 20, який працює під дією джерела напруги 24, змінюється режим роботи лічильника.

Коли затвор відкритий, вимірюється змінна і постійна складові вихідного сигналу, і відповідно коли закритий- тільки постійна, амплітуда якої пропорційна діаметру частинки. У зоні вимірювання система відбору проб 4, що складається з насоса 21, та двох резервуарів: 22 і 23, в першому міститься проба відібраного палива, в іншому - ця ж проба перевіряється лічильником, утворюється тонкий струмінь палива, який рухається з постійною швидкістю. Струмінь палива має таку форму, що в зоні переходу лазерного променя одночасно знаходиться не більше однієї частинки забруднення.

Лазерний промінь після проходження зони вимірювання гаситься апертурною діафрагмою 6. Перше вимірювання проводиться при закритому оптичному затворі 20 і закритому електронному замку 25. Випромінювання, розсіяне мікрочастинками, збирається лінзою 7 і подається на фотоприймач 9. Після проходження всього тесту на пам'ять мікропроцесора 18 реєструється кількість мікрочастинок і їх розподіл за розмірами. Але таке вимірювання складу

розсіяних мікробруднень, що виконується в сучасних приладах, має велику похибку до 30-40%, тому для уточнення розподілу складу розсіяних мікробруднювачів, рекомендується проводити повторні вимірювання коли оптичним затвор 20 відкритий та електронним ключем 25. Такі вимірювання дозволяють розрахувати суму мікрочастинок певного розміру (для яких коефіцієнт глибини модуляції сигналу дорівнює нулю). Це дозволить перевірити достовірність попередніх вимірювань( вимірювання).

У цьому режимі випромінювання 5, розсіяне частками, збирається лінзою 7 в апертурі 6 і направляється на фотоприймач 9, перед яким встановлена фонова діафрагма 8. Доплерівський сигнал з виходу фотоприймача 9 одночасно надходить на амплітудний детектор 10 і смуговий фільтр 11.

На виході амплітудного детектора 10 формується постійна складова доплерівського сигналу. Змінні складові доплерівського сигналу формуються на виході смугового фільтра 11, і сигнал з виходу амплітудного детектора (10) надходить на пороговий пристрій (12) та електронний ключ 13. Ключ знаходиться у відкритому стані.

Змінна складова доплерівського сигналу з виходу смугового фільтра 11 надходить на амплітудний детектор 14. Потім вихідний сигнал з детектора 14 надходить на пороговий пристрій 15. На виході порогового пристрою 15 формується імпульс який замикає електронний вимикач(ключ) 13. Причому постійна складова доплерівського сигналу не надходить в аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 17.

Коли змінна складова доплерівського сигналу наближається до нуля, на виході порогового пристрою 15 імпульс не формується. Електронний ключ 13 при цьому залишається відкритим.

Потім постійна складова доплерівського сигналу з виходу амплітудного детектора 10 проходить через електронний ключ 13 і надходить в АЦП. Перетворювач перетворює амплітудне значення постійної складової доплерівського сигналу в цифровий код. Цифровий код з АЦП передається на мікропроцесор (18), який визначає діаметр мікрочастинок, використовуючи



запрограмовані еталонні дані відповідності між діаметром частинки та амплітудою постійної складової доплерівського сигналу. Мікропроцесор (18) також отримує від лічильника імпульсів (16) кількість частинок, які пройшли вимірюваний об'єм. Далі мікропроцесор обчислює розподіл кількості частинок на основі розміру. Вся обчислювальна система працює від джерела живлення 19.

У такій схемі лазерний діод, кристал напівпровідника виконаний у вигляді дуже тонкої прямокутної пластини. Така пластинка, по суті є оптичним хвилеводом, де випромінювання обмежене відносно в невеликому просторі. Дві сторони (торці) кристала відполіровані, щоб утворити гладкі паралельні площини, які утворюють оптичний резонатор, тобто резонатором Фабрі-Перо.

І, кожен раз, коли фотон проходить через резонатор, випромінювання буде посилюватися завдяки механізму примусового випромінювання.[14]

### **2.5. Лазерні доплерівські вимірювачі швидкості**

Сучасні ЛДВШ являють собою складні оптико-електронні вимірювальні комплекси та системи, що поєднують у собі сучасні технічні рішення. Основною перевагою таких приладів є локальність зони проведення вимірювання та відсутність їх впливу на структуру потоку (безконтактність). Принцип роботи полягає в тому, що об'єкт, що рухається, опромінюють пучком лазерного випромінювання від нерухомого джерела. Це випромінювання відбивається від об'єкта та реєструється нерухомим приймачем. Внаслідок ефекту Доплера частота випромінювання, що опадає на приймач, буде відрізнятися від частоти випромінювання нерухомого джерела на деяку величину, пропорційну швидкості руху об'єкта щодо джерела та приймача.[15]

Тому, для визначення величини доплерівського зсуву частоти застосовують метод оптичного змішування. На фотоприймач спрямовуються одночасно дві світлові хвилі, що мають різні частоти. В результаті інтерференції цих хвиль інтенсивність світла на поверхні фотоприймача змінюється з частотою, що дорівнює різниці частот коливань цих хвиль. Фотодетектор перетворює світлове випромінювання в змінний електричний сигнал, величина якого прямо пропорційна інтенсивності світлового випромінювання на його поверхні в будь-

який момент. Таким чином, частота електричного сигналу фотоприймача виявляється рівною значенню доплерівського зсуву частоти і прямо пропорційною швидкості об'єкта. Для вимірювання частоти сигналу фотоприймача використовуються різні радіотехнічні методи.

У лазерній анемометрії використовується багато різних оптичних схем, серед яких найбільшого поширення набули так звані диференціальні схеми.

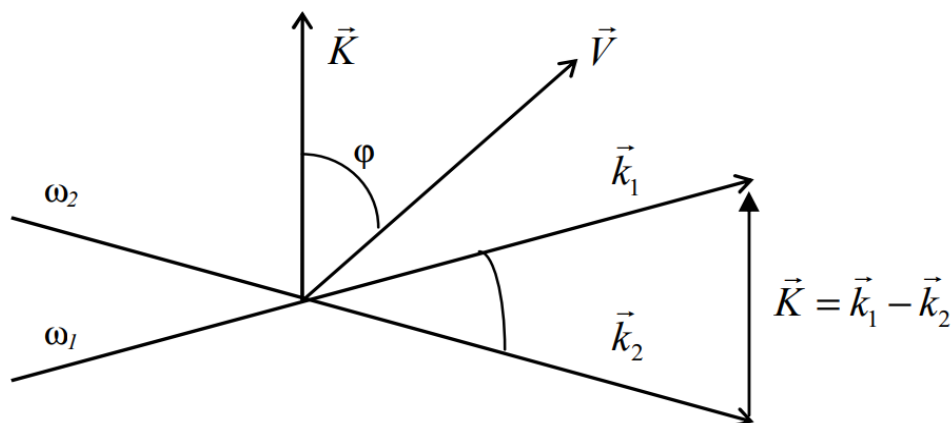


Рис.2.9. Диференційна схема ЛДА

У цих схемах на об'єкт, що рухається, спрямовується не один, а два монохроматичних пучка, і доплерівське зрушення залежить від напрямку спостереження розсіяного випромінювання. Вважатимемо, що у випадку частоти цих пучків неоднакові.

Якщо  $\omega_1, \vec{k}_1$  – частота та хвильовий вектор однієї хвилі,  $\omega_2, \vec{k}_2$  - частота і хвильовий вектор другої хвилі, то частоти розсіяного рухомою частиною світла можна знайти:

$$\omega_p = \omega_0 \left[ 1 - \frac{V}{c} (\cos\theta - \cos\psi) \right] \quad (2.5)$$

З (2.5) можна отримати вираз для зсуву розсіяної частоти хвилі  $\omega_D$ , обумовленого ефектом Доплера:

$$\omega_D = \omega_p - \omega_0 = -\omega_0 \frac{V}{c} (\cos\theta - \cos\psi)] \quad (2.6)$$

За абсолютною величиною хвильовий вектор  $k_0=2\pi/\lambda_0$ , і так як,  $k_p=\omega_p/c$ , а зміна частоти мала, то доплерівське зрушення частоти набуде вигляду:

$$\omega_D = (\vec{k}_p - \vec{k}_0)\vec{V} = \vec{K}\vec{V} \quad (2.7)$$

З урахуванням виразів (2.6) та (2.7) ці частоти рівні відповідно:

$$\omega_{1p} = \omega_1 + (\vec{k}_{1p} - \vec{k}_1)\vec{V},$$

$$\omega_{2p} = \omega_2 + (\vec{k}_{2p} - \vec{k}_2)\vec{V}.$$

Оскільки розсіяне випромінювання від двох лазерних пучків реєструється в одному напрямку, то можна прийняти  $\vec{k}_{1p} = \vec{k}_{2p}$ . Тоді доплерівське зрушення частоти

$$\omega_D = \omega_{2p} - \omega_{1p} = (\omega_2 - \omega_1) + \vec{K}\vec{V}$$

При рівності частот двох хвиль отримуємо вираження для доплерівського зсуву частоти

$$\omega_D = \vec{K}\vec{V} = 2Vk_0 \sin \frac{\alpha}{2} \cos\varphi \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.8) описує випадок інтерференції двох розсіяних на частинці хвиль, що мають різні частоти. При цьому в площині спостереження реалізується нестационарна інтерференційна картина, смуги якої рухаються щодо отвору вхідного фотоприймача з фазовою швидкістю.[16]

### 2.5.1. Лазерний доплеровський вимірювач швидкості та довжини

Використання лазерних вимірювачів швидкості застосовується частіше як для аерогідродинамічних потоків, так й для визначення довжини та швидкості довгомірних виробів під час їх виробництва (на прикладі електричних кабелів, проводів з покриттям). Але в таких пристроях використовується лазер з високим

ступенем просторової когерентності, і це безумовно збільшує вартість обладнання. Але, якщо лазер не має ступеня просторової когерентності 10 мм або більше, то в зоні вимірювання не буде формуватися інтерференційна картина, і насамперед доплерівський сигнал буде відсутній.

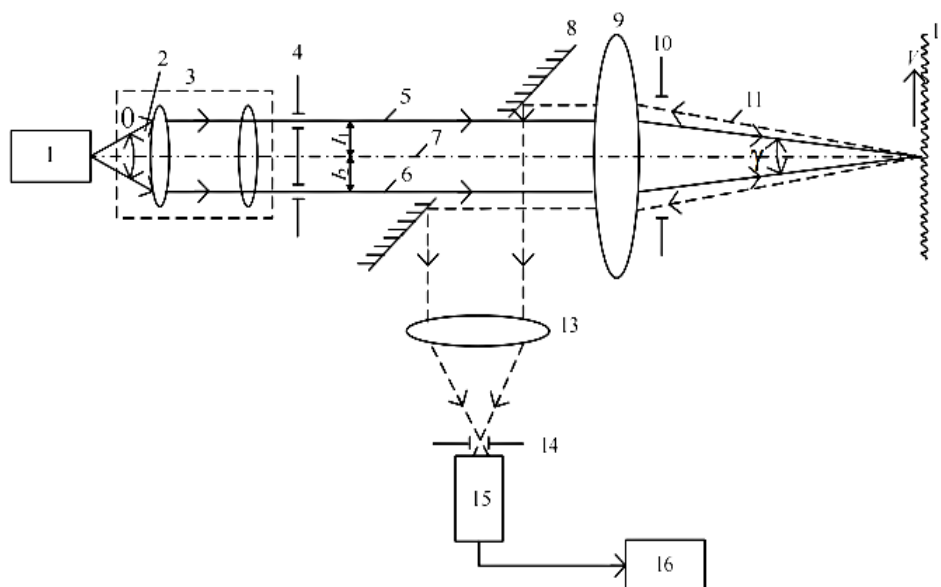


Рис.2.10. Схема лазерного доплерівського вимірювача швидкості та довжини

У цьому приладі за допомогою діафрагми з двома отворами від лазерного променя виділяються два променя, які через лінзу направляються на об'єкт вимірювання.

Апертури діафрагми розташовані на різній відстані від оптичної осі вимірювача. Таким чином, два лазерні промені, що утворюються на виході з діафрагми, проходять різні відстані до об'єкта вимірювання та інтерферують на поверхні об'єкта. Мінімальна різниця відстаней, яку повинні проходити лазерні промені дорівнює:  $\lambda$  ( - довжина хвилі), щоб відбулась інтерференція.

Завдяки малій різниці відстані, пройденої лазерним променем, в таких пристроях можна використовувати джерела лазерного випромінювання (наприклад, потужні лазерні діоди) з низьким ступенем просторової когерентності.

Даний доплерівський вимірювач швидкості працює так: випромінювання 2, що йде від лазерного діоду 1 з кутом відхилення  $\theta$ , надсилається до коліматора 3, де стає як паралельний пучок. Крім того, за допомогою діафрагми 4, яка має два круглих отвори, розділені два промені 5 і 6. Потім лазерні промені 5 і 6 направляються від лінзи 9 до об'єкта 12, швидкість якого вимірюється. Отвори діафрагми 4 (рис. 3.1.) розташовані на різній відстані  $l_1$  та  $l_2$  відносно оптичної осі даного вимірювача. Важливо зазначити, що отвори у діафрагмі 4, однакові  $d=d_1=d_2$ .

У зв'язку з тим, що різниця відстаней до об'єкта вимірювання 12, через який проходять промені 5 і 6, мала  $\Delta L \geq \lambda$  то, в ньому утворюється інтерференційна картина. Період схеми перешкод дорівнює:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\left[2 \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]}$$

де:  $\gamma$  – кут, під яким промені 5 і 6 спрямовані лінзою 9 на об'єкт вимірювання 12.

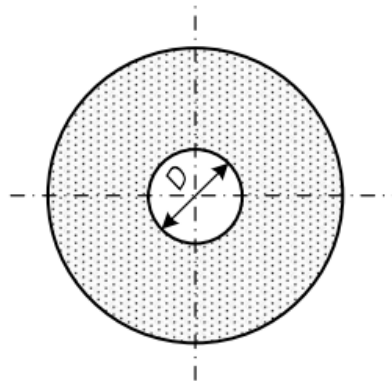


Рис.2.11. Форма дзеркала 8

Розсіяне і відбите випромінювання 12 від об'єкта вимірювання (11) випромінюється апертурною діафрагмою 10 і направляється на дзеркало 8 лінзою 9 (рис.2.11). Дзеркало 8 має отвір, діаметр якого більше за відстані відносно оптичної осі, та розташовано під кутом до оптичної осі вимірювача.

Випромінювання 11, яке відбивається дзеркалом 8, збирається лінзою 13 і направляється на фотоприймач 15. Для зменшення фонового освітлення перед фотоприймачем 15 встановлена діафрагма 14. Частота доплерівського сигналу, що формується на виході фотоприймача 15, пропорційна швидкості  $V$ , з якою рухається об'єкт. Потім вихідний сигнал із фотоприймача (15) надсилається до електронного блоку (16), де вимірюється частота доплерівського сигналу, його швидкість і довжина об'єкту. Довжина об'єкта (12) визначається інтегруванням швидкості  $V$  під час його руху.[17]

## **2.6. Лазерний доплерівський вимірювач істинної повітряної швидкості важкого безпілотного літального апарату**

ЛДВШ широко використовується в аеродинамічних дослідженнях потоків при розробці літальних апаратів. Такий прилад також використовується при дослідженні плоских вихрів [18], для вимірювання розмірів аерозолі та в інших задачах. Лідар був розроблений для вимірювання швидкості вітру в атмосфері.

Як джерело випромінювання використовується потужний  $\text{CO}_2$ -лазер. Він побудований за структурою з опорними променями. Його телескопічна оптична система забезпечує вимірювання швидкості вітру на відстані до 750 м.

Щодо бортового ЛДВШ, він був побудований для конструкції з опорними променями. Як джерело випромінювання використовується  $\text{CO}_2$ , що працює в інфрачервоному діапазоні ( $\lambda=10,6$  мкм), потужністю 50 Вт. Телескопічна оптична система фокусує лазерний промінь на ділянку діаметром 3 мм через прозоре вікно у фюзеляжі на відстані 20 м. Лазерне випромінювання, що розсіюється аерозолем, збирається телескопічною системою і за допомогою дзеркала направляється на фотоприймач. Для зменшення впливу часткової інтерференції фотоприймач охолоджується елементом Пельтьє до температури  $170^\circ$ . Частина лазерного випромінювання також була спрямована на фотоприймач. Вже на виході фотоприймача формується сигнал, пропорційний горизонтальній складовій вектора істинної швидкості повітря. Дослідження цього типу показали його працездатність до висоти 3000 м.

Основною перешкодою для подальшого розвитку бортових ЛДВС цього типу є необхідність використання потужного джерела лазерного випромінювання.

Для стабільної роботи потужних інфрачервоних лазерів постійний вплив на CO<sub>2</sub> полягає в необхідності використання водяного охолодження його дзеркал. Такі лазери також мають значні розміри і вагу (довжина трубки, розміщеної в оптичному резонаторі, становить 100 см). Але, останнім часом розроблені лазерні діоди, потужність яких становить сотні мВт, а вже більш потужні лазерні діоди генерують випромінювання в декілька ват. Такі джерела лазерного випромінювання починають знаходити застосування в ЛДВШ. Твердотільні джерела лазерного випромінювання мають невеликі розміри, електрооптичний ККД 60% і термін служби понад 10 000 годин. Їх можна використовувати для вимірювання швидкості повітря.

Але на відміну від газових лазерів якість їх випромінювання нижча. Так як газові лазери генерують лише промінь з круговим профілем, розбіжність якого не перевищує 3–4 кутових хвилин. Лазерні діоди генерують багатопроменеве випромінювання з більш широкою діаграмою спрямованості 1°-2° в горизонтальній площині і 5°-10° у вертикальній. Тому, така обставина не дає можливість застосування таких діодів в ЛДВШ диференціального типу.

Складність використання ЛДВШ для вимірювання швидкості літака полягає також у тому, що він повинен працювати в режимі прийому зворотного розсіяного випромінювання. У цьому випадку інтенсивність розсіяного випромінювання мала.

Але використання потужного лазерного діода, лавинного фотодіода з високим коефіцієнтом підсилення та оптичних елементів з невеликими габаритами та вагою дає можливість використовувати ЛДВШ у складі інтегрованої авіоніки важкого безпілотної літального апарату. Структура ЛДВШ двох складових істинної швидкості польоту важкого БПЛА, побудована на основі лазерного діода з низьким ступенем когерентності випромінювання. Працює наступним чином (рис.2.12.).

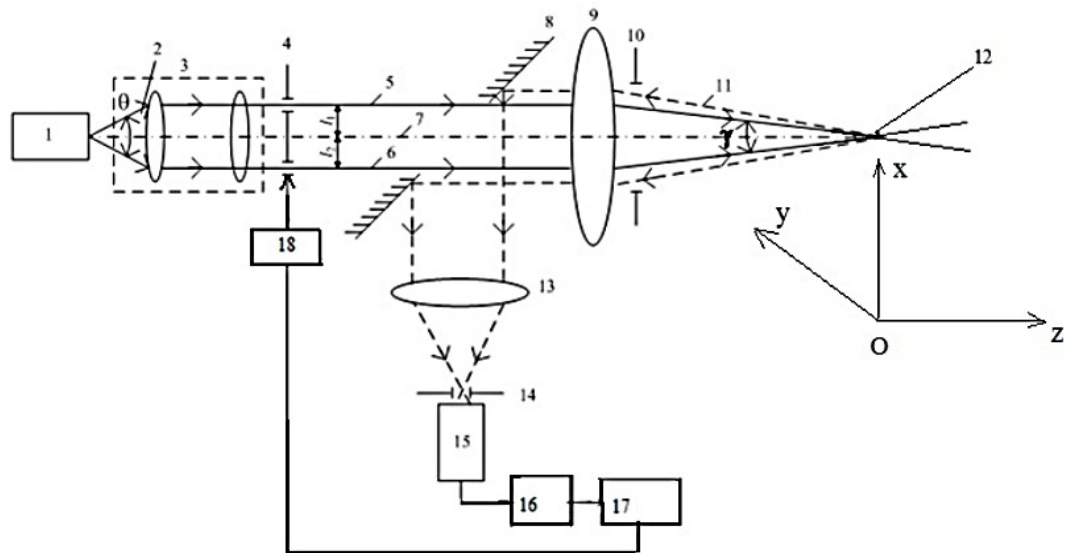


Рис.2.12. Структура лазерного доплерометрівського вимірювача двоскладової істинної швидкості повітряного судна

Випромінювання лазерного діода 1, яке поширюється під кутом  $\theta$ , спрямовується до коліматора 3, де стає паралельним пучком променів. За допомогою діафрагми 4, яка має два круглих отвори, з випромінювального діода виходять два лазерних променя 5 і 6. Апертури в діафрагмі 4 розташовані на різних відстанях 1 і 2 від оптичної осі приладу 7. Це зроблено для того, щоб лазерні промені 5 і 6 проходили різні відстані до зони вимірювання.

Важливо, щоб різниця відстаней не перевищувати довжину когерентності лазерного діода, так як потім, лазерні промені будуть інтерферувати зоні вимірювання.

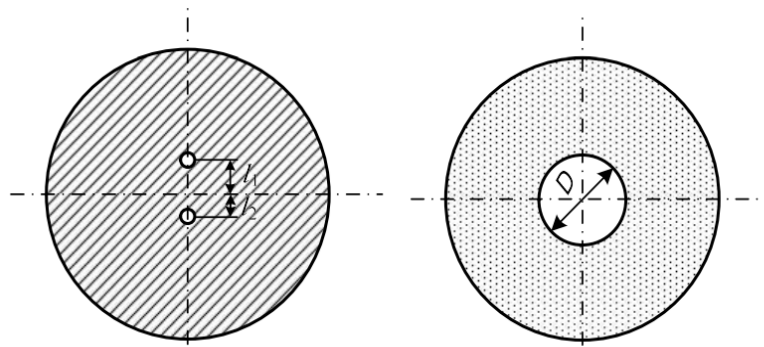


Рис.2.13. Форма діафрагми 4 і дзеркала 8



Відбите від дзеркала 11 випромінювання збирається лінзою 13 і направляється на лавинний фотодіод (ЛФД) 15 (рис.3.2.). Для зменшення впливу фонового випромінювання перед ЛФД встановлена діафрагма 14. Далі сигнал LDF посилюється широкосмуговим підсилювачем (16) і подається на АЦП 17.

Вихідний сигнал АЦП подається на бортовий процесор (18), який обчислює значення  $V_x$  компоненти вектора швидкості. Для вимірювання  $V_y$  вектора швидкості бортовий процесор подає команду на виконавчий пристрій 19. Цей пристрій повертає діафрагму 4 на кут  $90^\circ$ . Діафрагма формує два нових променя від випромінювання лазерного діода 1. пучки розташовані в площині  $Oxz$ . У цьому випадку аерозолі будуть перетинати інтерференційні смуги, паралельні осі  $Oy$ . Тоді вимірювання компонента  $V_y$  вектора швидкості аналогічно вимірюванню компонента  $V_x$ . [19]

## **2.7. Лазерні прилади вимірювання кутової швидкості**

У системах навігації та стабілізації рухомих об'єктів гіроскопічні пристрої є основними датчиками первинної інформації про кутові та, у багатьох випадках, лінійні переміщення об'єктів. Точність роботи гіроскопічних приладів багато в чому визначає точність системи навігації та стабілізації в цілому. Особливі вимоги пред'являються до точності гіроскопів сучасних космічних, авіаційних і морських систем. Одні з таких є саме лазерні та волоконно-оптичні гіроскопи для визначення кутової швидкості, розглянемо принцип роботи:

### **2.7.1. Лазерний гіроскоп**

Основою лазерного гіроскопа є так званий кільцевий лазер, резонатор якого складається з дзеркал, що розташовані по периметру деякого контуру (кільця). Найчастіше використовується резонатор, дзеркала якого розташовані у вершинах рівностороннього трикутника.

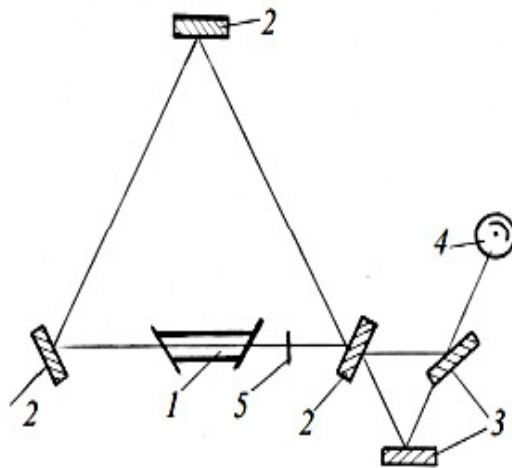


Рис.2.14. Схема кільцевого лазера

Якщо активне середовище 1 помістити в контур резонатора 2–2–2, то генеруючі коливання будуть поширюватися в ньому за годинниковою стрілкою і проти неї. Ці коливання виводяться з резонатора через одне з дзеркал 2, яке виконано частково прозорим, і за допомогою пристрою 3, зображеного на рис. 2.12, направляються на фотоприймач (фотопомножувач) 4. Конструктивно схема виконана може бути у вигляді моноблока:

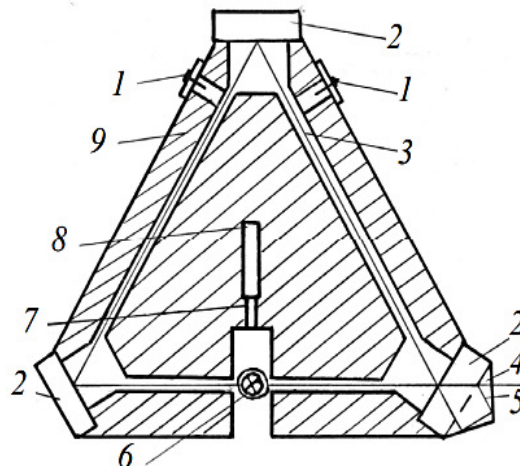


Рис.2.15. Конструкція лазерного гіроскопа в кварцовому моноблоці:

1 – клеми живлення; 2 – дзеркала резонатора; 3 – внутрішній канал; 4 – розщеплююча призма; 5 - вихід на фотодетектор; 6 – діафрагма; 7 – екран; 8 – катод; 9 – кварцовий моноблок

Якщо контур нерухомий, тобто не обертається навколо осі, перпендикулярної до площини контуру, то частоти обох коливань однакові. У

цьому випадку з виходу приймача 4 знімається постійний сигнал (частота оптичного випромінювання значно перевищує  $\omega$ , де  $\omega$  – постійна частота приймача). Якщо контур обертається навколо осі з кутовою швидкістю  $\Omega$ , то частоти коливань, що поширюються в протилежних напрямках, стають різними. Різниця між частотами двох коливань виявляється рівною

$$(2.9)$$

де  $S$  – площа;  $L$  – периметр контуру;  $\lambda$  – середня довжина хвилі коливань.

Якщо обидва коливання направляються на фотодетектор, вихідний електричний сигнал міститиме частоту, рівну різниці частот коливань ( $f_{биття}$ ). Частота називається частотою биття. Звідси виходить що  $f_{биття} = \Omega$ .

Таким чином, знаючи або вимірюючи частоту поштовхів і параметри контура, можна визначити кутову швидкість обертання петлі. Цей метод вимірювання кутових швидкостей дуже чутливий, оскільки частоти оптичного випромінювання дуже високі, і навіть невелика швидкість обертання викликає велику різницю частот. З рівняння (2.9) слідує, що частота биття теоретично пропорційна кутовій швидкості обертання контуру. Однак існує явище, яке спотворює цю залежність. Воно називається захопленням частоти і полягає в тому, що при низьких швидкостях обертання частота биття зникає (випромінювання з'являється на одній частоті, яка отримує певну перевагу в інтенсивності над іншою). Тому залежність  $f$  від  $\Omega$  має такий вигляд:



Рис.2.16. Залежність частоти биття від швидкості обертів контура

Щоб усунути явище захоплення частот хвиль, що приходять, штучно розширюють, тобто, збільшують розрив між ними. Для цього використовуються невзаємні елементи (елемент 5 на рис. 2.15). Суть роботи невзаємного елемента

полягає в тому, що він нерівномірно діє на зустрічні хвилі. Наприклад, якщо вектори електричного поля зустрічних хвиль обертаються в різні боки, а в невзаємному елементі швидкість обертання для однієї хвилі збільшується, а для іншої зменшується (наприклад, за рахунок ефекту Фарадея), то оптичні шляхи зустрічних хвиль стають неоднаковими і виникає різниця частоти навіть без обертання. Таким чином, використання невзаємного елемента усуває явище перехоплення частоти. Крім того, усувається неоднозначність читання напрямку руху, властива квантовому гіроскопу, оскільки за наявності невзаємного елемента обертання контура в різні боки призводить або до зменшення, або до збільшення частоти, створюваної гіроскопом. Але, кільцевий лазер називають квантовим гіроскопом, це пояснюється тим, що так як кожен кільцевий лазер обертається разом із Землею, потужність лазера залежатиме від орієнтації осі обертання ланцюга відносно вектора кутової швидкості обертання Землі: пристрій як би відчуває напрямок вектора кутової швидкості. Зміна положення контура призводить до зміни вихідного сигналу. Це стосується не тільки кільцевих лазерів, розташованих на Землі.

Таким чином, функції кільцевого лазера подібні до функцій гіроскопа, а у формулі (2.9)  $\Omega$  — проекція кутової швидкості петлі на вісь, перпендикулярну до площини петлі. З принципу роботи квантового гіроскопа ясно, що він може бути використаний для вимірювання широти точки на Землі, напрямки меридіальної площини (тобто працювати як квантовий компас), визначення вертикалі в цій точці Землі, а також для вимірювання кутової швидкості обертання та кутів повороту. В останньому випадку вихідний сигнал пристрої інтегрується.

Чутливість квантового гіроскопа пропорційна периметру кільцевого резонатора. Для збільшення довжини кільцевого резонатора можлива спіральна конструкція з невеликим розміром одного витка.[20]

## 2.7.2. Волоконно-оптичний лазерний гіроскоп

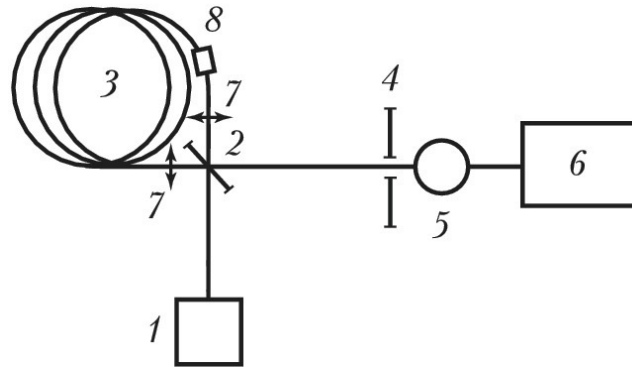


Рис.2.17. Схема волоконно-оптичного гіроскопа

Швидкісний гіроскоп, заснований на використанні ефекту Саньяка - зміщення інтерференційних смуг в кільцевому інтерферометрі, що обертається (можливість експериментального визначення кутової швидкості обертання системи для розташованого в ній спостерігача, тобто можливість визначення неінерційності руху системи). Це зміщення виникає внаслідок залежності часу обходу світлом обертового контуру від швидкості обертання  $\Omega$  та напрямки обходу. Вираз для різниці  $\Delta\tau$  часу обходу обертового контуру зустрічними електромагнітними хвилями дає релятивістська теорія відносності, а для нерелятивістських швидкостей

$$\Delta\tau = 4S\Omega\cos\varphi/c^2$$

де  $S$  – площа контуру,  $\varphi$  – кут між віссю обертання та нормаллю до площини контуру,  $c$  – швидкість світла. При цьому величина зсуву інтерференційних смуг

$$\Delta z = 4S\Omega\cos\varphi/\lambda_0 c$$

Реєстрація малих кутових швидкостей обертання вимагає великої площі контуру, тому практично використання ефекту Саньяка стало можливим з появою оптичних волокон.

Чутливий елемент волоконно-оптичного гіроскопу являє собою обертову багатовиткову котушку з одномодовим оптичним волокном, що забезпечує стабільність різниці фаз зустрічних хвиль (рис.2.13). Зміщення інтерференційних смуг у волоконно-оптичного гіроскопу пропорційна числу  $N$  витків волокна в котушці, не залежить від положення осі обертання відносно центру котушки, від форми площі контуру  $S$ , від показника заломлення і записується як:

$$\Delta z = 2LRN \cos \varphi / \lambda_0 c$$

де  $2LRN$  - довжина світловода,  $R$  – радіус катушки

У дійсності волоконно-оптичний гіроскоп використовують більш складні методи реєстрації з використанням фазової модуляції, фазової компенсації тощо. Гранична чутливість волоконно-оптичного гіроскопу порядку  $10^{-4}$  град/год обмежується нестабільністю оптичних характеристик, волокна, розсіювання світла в ньому, шуми фотоприймача.[20]

## 2.8. Застосування лазера у дослідженнях в навколишньому світі

Як відомо, когерентність світла пояснюється постійним у часі співвідношенням між фазами світлових хвиль, що створює можливість інтерференції. Когерентні промені отримують з одного джерела. Існує різниця між повною і частковою когерентністю світла. Повна когерентність має місце, коли контрастність інтерференційної картини ідеальна, тобто мінімальна інтенсивність світла в області тіні дорівнює нулю; часткова — якщо контраст не є ідеальний. Якщо контрасту немає, то світло абсолютно некогерентне.

Під інтерференцією світла розуміють перерозподіл інтенсивності світла в результаті суперпозиції кількох когерентних світлових хвиль. Таке явище супроводжується чергуванням інтенсивностей максимумів і мінімумів у просторі. А сам розподіл утворює інтерференційну картину. Для виникнення хвилі значної амплітуди потрібна дуже велика маса випромінювача або прискорення, амплітуда гравітаційної хвилі прямо пропорційна прискоренню та масі генератора, тобто *та*.

Якщо об'єкт рухається з прискореною швидкістю, це означає, що на нього діє сила з боку іншого об'єкта. Потім інший об'єкт відчуває протилежний ефект (згідно з третім законом Ньютона) і виявляється:  $m_1 a_1 = - m_2 a_2$ . Виявляється, два об'єкти випромінюють гравітаційні хвилі тільки в парі, і в результаті інтерференції вони істотно гасять один одного. Тому гравітаційне випромінювання в загальній теорії відносності завжди принаймні квадрупольне до мультипольного. Крім того, для нерелятивістських випромінювачів є малий параметр у виразі інтенсивності випромінювання  $(\frac{r}{ct})^4$ , де  $r$  — характерний

розмір випромінювача,  $T$  — характерний період руху випромінювача,  $c$  — швидкість світла.[21]

Будь-яка подвійна зоряна система, обертаючись навколо спільного центру мас, втрачає енергію через випромінювання гравітаційних хвиль і повинна зрештою злитися в одну зірку. Але для звичайних некомпактних подвійних зірок цей процес займає дуже багато часу (необхідний час значно перевищує вік Всесвіту). Якщо подвійна компактна система складається з пари нейтронних зірок, чорних дір або їх комбінації, то злиття може відбутися через кілька мільйонів років. Спочатку об'єкти зближуються один з одним і період їх обертання зменшується. Цей процес триває частки секунди, і за цей час у вигляді гравітаційних хвиль випромінюється енергія, що становить, за деякими оцінками, близько 5% маси системи.

Безпосередня реєстрація гравітаційних хвиль досить складна через слабкість гравітаційної взаємодії — вона майже на 40 порядків слабша електромагнітної, тому гравітаційні хвилі спричиняють дуже мале викривлення метрики. Пристроєм для їх реєстрації є детектор гравітаційних хвиль. Колапс подвійного пульсара породжує гравітаційні хвилі з помітною амплітудою. Такі події відбуваються в околицях нашої галактики приблизно раз на десять років. З іншого боку, загальна теорія відносності передбачає прискорення обертання подвійних зірок через втрату енергії від випромінювання гравітаційних хвиль, і цей ефект достовірно зафіксовано в кількох відомих системах подвійних компактних об'єктів (зокрема, пульсарів з компактні супутники).[21]

### **2.8.1. Застосування лазерного інтеферометра під час відкриття гравітаційних хвиль**

Відкриття подвійної пульсарної системи PSR B1913+16 Халсом і Тейлором і подальші спостереження втрати енергії Тейлором і Вайсбергом показали існування гравітаційних хвиль. Таке відкриття разом із новим розумінням астрофізики, призвело до визнання того, що прямі спостереження амплітуди та фази гравітаційних хвиль дозволять вивчати додаткові релятивістські системи та забезпечать нові перевірки загальної теорії відносності, особливо в динамічних

режимах сильного поля. Експерименти з виявлення гравітаційних хвиль почалися з досліджень Вебера та його резонансного масового детектора в 1960-х роках, після чого з'явилася міжнародна мережа детекторів криогенного резонансу.

Дослідження шуму та продуктивності таких детекторів, а також подальші концепції їх удосконалення призвели до пропозиції ширококутового лазерного інтерферому з довгою базою з потенціалом значного підвищення чутливості. На початку 2000-х було завершено набір початкових детекторів, включаючи, GEO 600 в Німеччині, Обсерваторію гравітаційних хвиль лазерного інтерферометра ( ) в Сполучених Штатах і Virgo в Італії.

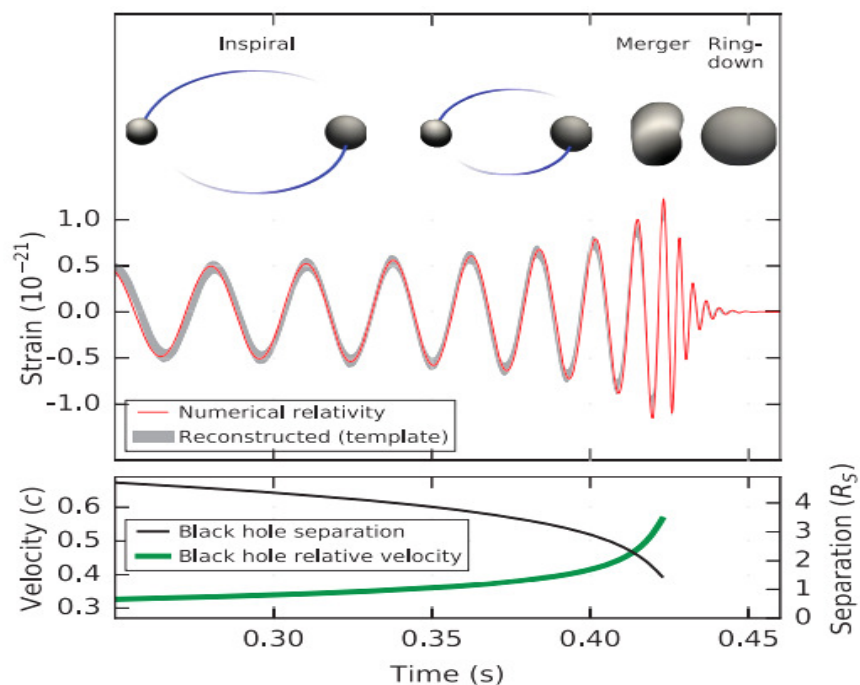


Рис.2.18. Числові моделі відносності горизонтів чорних дір

З рисунку можна бачити, розраховану амплітуду деформації гравітаційної хвилі, і відповідно Кеплерівське ефективне розділення чорних дір в одиницях радіусів Шварцшильда ( ), і ефективною відносною швидкістю, задану постньютонівським параметром  $\frac{v}{c}$ , де  $\omega$  — частота гравітаційної хвилі, розрахована за допомогою числової відносності, а  $M$  — загальна маса.

Гравітаційно-хвильова астрономія широко використовує багато окремі детектори для розрізнення гравітаційних хвиль від місцевого інструментального



шуму та шуму навколишнього середовища, щоб забезпечити локалізацію джерела неба та виміряти поляризацію хвиль.

LIGO складається з двох обсерваторій: в Лівінгстоні (штат Луїзіана) і в Генфорді (штат Вашингтон), віддалених одна від одної на 3002 кілометри. Оскільки швидкість поширення гравітаційних хвиль, яку очікують, дорівнює швидкості світла, ця відстань дає різницю в 10 мілісекунд, яка дозволить визначити напрям на джерело зареєстрованого сигналу.

Основний елемент кожної обсерваторії — Г-подібна система, яка складається з двох чотирикілометрових плечей з високим вакуумом всередині. Усередині такої системи встановлений модифікований інтерферометр Майкельсона, в кожному плечі якого завдяки додатковим дзеркалам з кварцового скла утворені резонатори Фабрі-Перо, такі дзеркала на спеціальній підвісці є пробними масами, відстань між якими змінює саме гравітаційна хвиля, що збільшує одне плече і одночасно вкорочує друге.

Перший лазерний промінь проходить через одностороннє дзеркало, яке пропускає світло від лазера та відбиває світло від інтерферометра, таким чином діючи як рециркулятор енергії та дозволяючи використовувати 200-ватний лазер замість 750-кіловатного. Потім промені потрапляють в інтерферометр і розділяються світлоподільником на два промені, кожний з яких скеровується у відповідне плече інтерферометра і проходить резонатор Фабрі-Перо близько 280 разів, багаторазово відображаючись на кінці і на початку плеча, що значно підвищує чутливість інтерферометра. Пізніше промені з двох плечей складаються у фотодетекторі, і різниця ходу між ними викликає зміну струму в детекторі.[22]

Одночасно з основним інтерферометром може бути використаний «малий» інтерферометр. Довжина плеча такого інтерферометра вдвоє менша (2 кілометри), а різкість резонаторів Фабрі-Перо в плечах та ж, що і у основного інтерферометра, що відповідає вдвоє меншому часу затухання. Гравітаційна хвиля, що проходить, ефективно змінює довжину плеча так, що виміряна різниця становить  $\Delta L(t) = \delta L_x - \delta L_y = h(t)L$ , де  $h$  – амплітуда деформації гравітаційної хвилі, спроектована

на детектор. Ця диференціальна зміна довжини змінює різницю фаз між двома світловими полями, що повертаються до розсіювача променя, передаючи оптичний сигнал, пропорційний деформації гравітаційної хвилі, на вихідний фотодетектор.

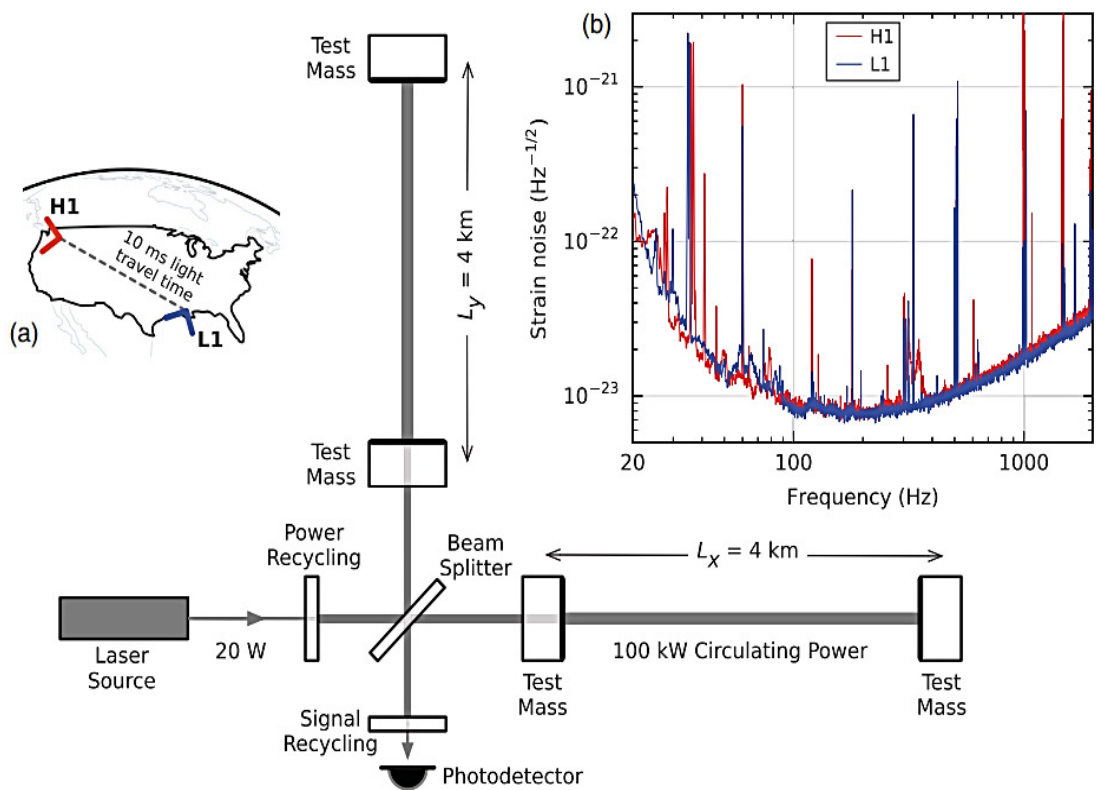


Рис.2.19. Спрощена схема детектора LIGO (без масштабу)

Гравітаційна хвиля, що поширюється ортогонально до площини детектора і лінійно поляризована паралельно 4-кілометровому оптичному резонатору, матиме ефект подовження одного плеча на 4 км і скорочення іншого плеча на півперіоду хвилі; ця зміна довжини змінюється на іншу половину циклу.

Вихідний фотодетектор фіксує ці зміни довжини резонатора. Хоч спрямований відгук детектора є максимальним для цього випадку, він все ще важливий для більшості інших кутів падіння або поляризації. Як можна бачити на вставці (а): розташування та орієнтація детекторів LIGO у Хенфорді, штаті Вашингтон ( ) та Лівінгстоні, Луїзіана ( ); вставка (b): Шум приладу для

кожного детектора поблизу часу виявлення сигналу, така ампліудна спектральна щільність, виражена через еквівалентну амплітуду деформації гравітаційної хвилі.

Чутливість обмежена шумом фотонного удару на частотах вище 150 Гц і суперпозицією інших джерел шуму на нижчих частотах. Вузкосмугові функції включають лінії калібрування (33–38, 330 і 1080 Гц), режими коливань підвісних волокон (500 Гц і гармоніки) і гармоніки електромережі 60 Гц. Повертаючись до схеми варто сказати, що частково прозоре дзеркало з рециркуляцією потужності на вході забезпечує додаткове резонансне накопичення лазерного світла в інтерферометрі в цілому: тобто, 20 Вт вхідного лазера збільшується до 700 Вт, що падають на розсіювач променя, який додатково збільшується до 100 кВт, що циркулює в кожній порожнині плеча. Також оптимізується дзеркало рециркуляції сигналу з частковим пропусканням на виході виділення гравітаційно-хвильового сигналу шляхом розширення ширини смуги порожнин плеча.[23]

Інтерферометр освітлюється лазером *Nd:YAG* з довжиною хвилі 1064 нм, стабілізованим по амплітуді, частоті та геометрії променя. Сигнал гравітаційної хвилі виділяється на вихідному порту за допомогою гомодинного зчитування. Ці методи інтерферометрії розроблені для максимального перетворення деформації в оптичний сигнал, таким чином мінімізуючи вплив фотонного шуму (основного шуму на високих частотах). Висока чутливість до деформації також вимагає, щоб тестові маси мали низький шум переміщення, що досягається шляхом ізоляції їх від шуму (низьких частот) і проектування з низьким тепловим шумом (проміжні частоти).

Тепловий «шум» зведено до мінімуму завдяки використанню матеріалів із низькими механічними втратами у тестових масах та їх суспензії: тестові маси являють собою 40-кілограмові плавлені кремнієві підкладки з діелектричними оптичними покриттями з низькими втратами та підвішені до плавлених кремнієвих волокон вищого ступеня.

Щоб мінімізувати додаткові джерела шуму, усі компоненти, окрім джерела лазера, монтуються на віброізоляційні ступені в надвисокому вакуумі. Щоб

зменшити коливання оптичної фази, спричинені релєївським розсіюванням, тиск у трубках діаметром 1,2 м, підтримується нижче 1 мкПа.

Сервоприводи використовуються для утримання порожнин рук резонанс і підтримувати належне вирівнювання оптики компоненти. Вихідний сигнал детектора калібрується за деформацією шляхом вимірювання його відповіді на тестовий рух маси, спричинений тиском фотонів від модульованого калібрувального лазерного променя. Калібрування встановлюється з похибкою ( $1\sigma$ ) менше 10% за амплітудою та 10 градусів за фазою, і постійно контролюється калібрувальними лазерними збудженнями на вибраних частотах.[24]

Для підтвердження абсолютного калібрування використовуються два альтернативні методи: один щодо довжини хвилі лазера, а інший – радіочастотного генератора. Для моніторингу збурень навколишнього середовища та їх впливу на детектори кожна обсерваторія оснащена набором датчиків: сейсмометрами, акселерометрами, мікрофонами, магнітометрами, радіоприймачами, датчиками погоди, моніторами живлення змінного струму та детектором космічного випромінювання.

Перевірка точності часу здійснюється за допомогою атомного годинника та вторинного приймача GPS в кожній обсерваторії.

На найбільш чутливих діапазонах (100–300 Гц), детектори LIGO в 3-5 разів чутливіші до деформації, ніж початкові детектори LIGO; на нижчих частотах посилення ще більше, ніж у десять разів кращою чутливістю нижче 60 Гц. [25]

## РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ОПТИЧНОГО ПРИЛАДУ РЕЄСТРАЦІЇ НАДМАЛИХ ОБ'ЄМНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

Процес функціонування ЛДВШ, як оптичного пристрою, можна представити загальною схемою:

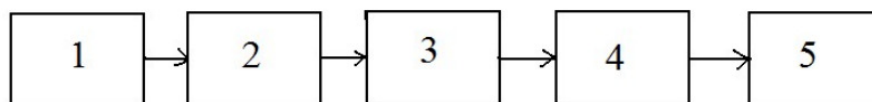


Рис. 3.1. Загальна схема роботи ЛДВШ: 1 - формування зони вимірювання за допомогою джерела когерентного лазерного випромінювання та елементів; 2 – розсіювання лазерного випромінювання на неоднорідностях потоку рідини; 3 – збір розсіяного випромінювання від оптичних елементів і направлення його на фотоприймач; 4 – перетворюється фотоприймачем у розсіяне випромінювання в електричний сигнал; 5 – вимірювання частоти та доплерівського сигналу

Тип джерела лазерного випромінювання, кількість і склад оптичних елементів залежить від кількості вимірюваних компонент вектора швидкості потоку (одна, дві або три компоненти) і структури ЛДВШ. У зоні вимірювання диференціального типу ЛДВШ інтерференційна картина формується в зоні перетину лазерних променів.

Видимість інтерференційної картини буде дорівнювати одиниці, якщо лазерні промені будуть мати однакову інтенсивність і їх поляризації узгоджені. Для цього в ЛДВШ диференціального типу вирівнюються інтенсивності лазерних променів. Крім того, стан лінійної поляризації утворює промінь з коливанням електричного вектора, перпендикулярного до площини, утвореної променем.

					НАУ. 21. 01 .55 000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розроб.		Савранський В.А.			РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ОПТИЧНОГО ПРИЛАДУ РЕЄСТРАЦІЇ НАДМАЛИХ ОБ'ЄМНИХ ДЕФОРМАЦІЙ	Лім.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дивнич М.П.						
Реценз.						ФАЕТ- 214 гр.		
Н. Контр.		Дивнич М.П.						
Затверд.		Мельник Ю.В.						

При розсіюванні лазерного випромінювання неоднорідністю потоку змінюється його інтенсивність і стан поляризації. Для зменшення методичної похибки вимірювання в потік штучно вводять мікрочастинки певного розміру.

Для визначення впливу параметрів розсіяного мікрочастинками випромінювання на глибину модуляції доплерівського сигналу та його співвідношення сигнал/шум необхідно розробити математичну модель оптичного сигналу, який формується випромінюванням, розсіяним мікрочастинками. Така математична модель може бути створена на основі наступних теорій світлорозсіювання:

- теорія розсіювання Релея;
- теорії розсіювання Релея-Ганса;
- теорії розсіювання Мі;
- дифракційна теорія розсіювання.

Теорія розсіювання Релея-Ганса охоплює ширший діапазон мікрочастинок, розмір яких набагато менший, ніж  $d \ll \lambda / (n-1)$  (де  $n$  – показник заломлення мікрочастинки). Така теорія справедлива лише для мікрочастинок, показник заломлення яких близький до показника заломлення середовища потоку. Тому створення на його основі математичної моделі оптичного сигналу недоцільно.

Теорія релєївського розсіювання може бути використана для визначення параметрів розсіювання випромінювання на мікрочастинках, діаметр яких значно менший за довжину хвилі лазерного світла. Мікрочастинки такого розміру в ЛДВШ не використовуються. Щодо дифракційної теорії розсіювання, вона справедлива тільки для мікрочастинок діаметром від 1 мкм до сотень. Але така модель сигналу не враховує зміну стану поляризації випромінювання та його фази при розсіюванні. Тому при створенні моделі формування сигналу ЛДВШ

доцільніше використовувати теорію Мі-розсіяння, яка повністю експериментально підтвержена.

### 3.1 Математична модель сигналу

У ЛДВШ розсіяне випромінювання збирається приймальною оптикою і направляється на фотоприймач. На його поверхні утворюється інтерференційна картина. Утворюється в результаті інтерференції розсіяних променів від двох лазерних променів.

Для розробки математичної моделі оптичного сигналу необхідно спочатку визначити параметри двох розсіяних хвиль (інтенсивність і стан поляризації) для кожного напрямку їх прийому. Напрями прийому випромінювання визначаються межами апертурної діафрагми.

Сферичні мікрочастинки проходять центр зони вимірювання оптичного приладу. Відомі оптичні характеристики діаметра та показника заломлення комплексу мікрочастинок. У будь-який момент часу в зоні вимірювання знаходиться не більше однієї мікрочастинки. За допомогою генератора мікрочастинок реалізується одночастинковий режим роботи. Лазерні промені будуть мати стан лінійної поляризації. Електричний вектор лазерного променя перпендикулярний до утвореної ним площини.

Використовуючи систему координат , розглянемо розсіяння лінійно поляризованої хвилі на мікрочастинці.

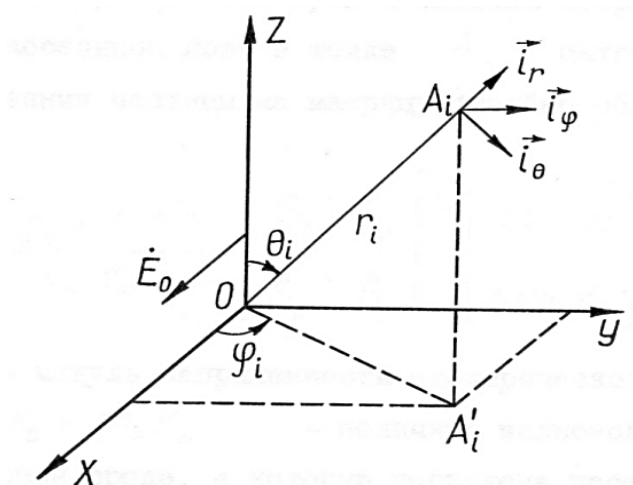


Рис.3.2. Система координат для визначення складових розсіяної хвилі

Вздовж осі Oz буде роповсюджуватись лазерний промінь, а електричний вектор інтенсивності лазерного променя  $E = E_0 e^{-jvt}$  лежить у площині Oxz ( $E_0$ - модуль напруженості електричного поля лазерного променя;  $v$ - лазерне випромінювання частоти).

Для визначення складових розсіяної хвилі в довільно вибраній точці  $A_i$ , положення якої задається кутами  $\theta_i$  та  $\varphi_i$  і відстанню  $r_i$ , вводиться додаткова система координат  $\bar{i}_\theta, \bar{i}_r, \bar{i}_\varphi$ . Вектор  $\bar{i}_r$  збігається з напрямком поширення розсіяної хвилі,  $\bar{i}_\theta$  розташований в площині  $OAA_i$ , а вектор  $\bar{i}_\varphi$  перпендикулярний до площини  $OAA_i$  і і напрямлений так, що утворює праву систему координат. Тоді компоненти розсіяної хвилі в точці  $A_i$  можна знайти, помноживши матрицю розсіювання мікрочастинки на матрицю-стовпчик лазерного променя.

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{\varphi is} \\ \dot{E}_{\theta is} \end{bmatrix} = \frac{E_0 e^{-jk_0 r_i}}{k_c r_i} = \begin{bmatrix} \dot{S}_1 & \dot{S}_2 \\ \dot{S}_4 & \dot{S}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \varphi_i \\ \cos \varphi_i \end{bmatrix}$$

де:  $E_0$ - модуль напруженості електричного поля лазерного променя;  $k_c = m_c k_0$ - хвильовий вектор випромінювання в рідкому середовищі, в якому рухається мікрочастинка;  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ - хвильовий вектор випромінювання у вакуумі;  $n_c$ - показник заломлення середовища;  $k_c$ - показник поглинання;  $\dot{S}_1, \dot{S}_2, \dot{S}_3, \dot{S}_4$ - амплітудні функції розсіяння. Амплітудна функція розсіювання для однорідних сферичних мікрочастинок  $\dot{S}_3 = \dot{S}_4 = 0$ .

Згідно теорії Мі, можна описати розсіювання випромінювання сферичною, однорідною мікрочастинкою, діаметр якої пропорційний довжині хвилі. Щоб знайти компоненти розсіяних хвиль, необхідно розв'язати повний розв'язок рівняння електромагнітного поля.[26] Це рішення являє собою поширення електромагнітних хвиль всередині сфери і поза нею. На великих відстанях від мікрочастинки, амплітуди функції розсіювання  $\dot{S}_1$  та  $\dot{S}_2$  будуть знаходитися у вигляді рядів:



$$\begin{aligned}\dot{S}_1 &= \sum_{l=1}^l [c_l(\rho, m)Q_l(\cos\theta_i) + b_l(\rho, m)S_l(\cos\theta_i)], \\ \dot{S}_2 &= \sum_{l=1}^l [c_l(\rho, m)S_l(\cos\theta_i) + b_l(\rho, m)Q_l(\cos\theta_i)]\end{aligned}\tag{3.1}$$

де:  $\rho = (\frac{\pi d}{\lambda})$  - хвильовий параметр мікрочастинки;  $d$  - діаметр мікрочастинки;  
 $\rho = (\frac{\pi d}{\lambda})$  - комплексний показник заломлення мікрочастинки;  $n$  - показник заломлення;  $k$  - показник поглинання.

Амплітуди парціальних хвиль, включені в рівняння (3.1), можна розрахувати за наступним виразом:

$$c_l(\rho, m) = q_l C_l = c'_l + j c''_l$$

$$b_l(\rho, m) = q_l B_l = b'_l + j b''_l$$

$$C_l = \frac{\psi_l(\rho)\dot{\psi}_l(m\rho) - m\dot{\psi}_l(\rho)\psi_l(m\rho)}{\xi_l(\rho)\dot{\psi}_l(m\rho) - m\dot{\xi}_l(\rho)\psi_l(m\rho)}$$

$$B_l = -\frac{\psi_l(\rho)\dot{\psi}_l(m\rho) - m\dot{\psi}_l(\rho)\psi_l(m\rho)}{\xi_l(\rho)\dot{\psi}_l(m\rho) - m\dot{\xi}_l(\rho)\psi_l(m\rho)}$$

$\xi_l(z) = \psi_l(z) + j\chi_l(z)$ , де  $z$  приймає значення  $\rho$  або  $m\rho$

Функції  $\psi_l(z)$  та  $\chi_l(z)$  знаходяться за допомогою рядів, де перші три члена виглядають так:

$$\psi_0(z) = \sin z,$$

$$\psi_1(z) = \frac{\sin z}{z} - \cos z,$$

$$\psi_2(z) = \left(\frac{3}{z^2} - 1\right) \sin z - \frac{3}{z} \cos z,$$

$$\chi_0(z) = \cos z,$$

$$\chi_1(z) = \sin z + \frac{\cos z}{z}$$

$$\chi_2(z) = \left(\frac{3}{z^2} - 1\right) \cos z + \frac{3}{z} \sin z$$

Відповідно для таких рядів будуть рекурентні формули:

$$\eta_l(z) = \frac{2l-1}{z} \eta_{l-1}(z) - \eta_{l-2}(z),$$

$$\dot{\eta}_l(z) = \eta_{l-1}(z) - \frac{l}{z} \eta_l(z)$$

Функції  $S_l(\cos\theta_i)$  та  $Q_l(\cos\theta_i)$  залежать від кута, під яким поширюється розсіяна хвиля, і визначається через поліном Лежандра за ітераційною(рекурентною) формулою:

$$Q_l(\cos\theta_i) = \frac{2l-1}{l-1} \cos\theta_i Q_{l-1}(\cos\theta_i) - \frac{l}{l-1} Q_{l-2}(\cos\theta_i)$$

$$S_l = \frac{l^2}{2l+1} Q_{l+1}(\cos\theta_i) - \frac{(l+1)^2}{2l+1} Q_{l-1}(\cos\theta_i)$$

Відповідно, члени функції  $Q_l(\cos\theta_i)$  та  $S_l(\cos\theta_i)$  мають вигляд:

$$Q_1(\cos\theta_i) = 1, S_1(\cos\theta_i) = -\cos\theta_i; Q_2(\cos\theta_i) = -3\cos\theta_i, S_2(\cos\theta_i) = 6\cos^2\theta_i - 3; Q_3(\cos\theta_i) = 0,5(15\cos^2\theta_i - 3), S_3(\cos\theta_i) = -0,5(45\cos^3\theta_i - 33\cos\theta_i).$$

Але, числове рішення розсіяння  $M_i$ , може бути отримано тільки за допомогою ЕОМ, тому що великий обсяг обчислень, потрібно виконати для визначення амплітуд розсіяної хвилі.

Особливість  $M_i$  полягає у тому:

- велика частина випромінювання розсіюється вперед під невеликим кутом і індикатриса набуває «подовженого» характеру зі збільшенням розміру мікрочастинок.
- складна залежність індексу розсіювання від кута, і зі збільшенням хвильового параметра  $\rho$  кількість коливань індикатриса зростає;

Якщо мікрочастинку опромінити лінійно поляризованим пучком, то розсіяне випромінювання стає еліптично поляризованим. Тобто, розсіяна хвиля залишається лінійно поляризованою лише в напрямках поширення, що збігаються з площинами  $Oxz$  та  $Oyz$  (де складова хвиль становить  $(E_{\theta i} = E_{\varphi i} = 0)$ )

Інтенсивність, поляризація і фаза розсіяної хвилі істотно залежать від напрямку її поширення, який визначається кутом  $\theta_i$ .

У оптичного приладу реєстрації надмалих об'єктів мікрочастинки перетинають зону вимірювання, яка формується двома лазерними променями, що перетинаються під кутом  $\gamma$ . І під час розсіювання мікрочастинки в кожному напрямку будуть поширюватися дві хвилі, що відрізняються за інтенсивністю, поляризацією та фазою.

Для подальшого аналізу необхідно, щоб у зоні вимірювання ЛДВШ знаходилась сферична мікрочастинка, що буде опромінюватися 2 променями. Тоді треба знайти компоненти розсіяної хвилі в точці, яка знаходиться в зоні приймальної апертури ЛДВШ.

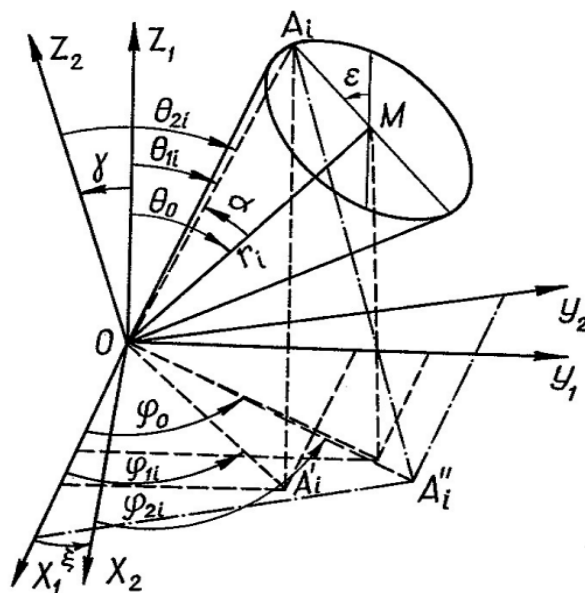


Рис.3.3. Система координат для визначення складових хвиль, розсіяних в зоні приймальної апертури ЛДВШ диференційного типу

У загальному випадку система координат, пов'язана з лазерним променем, повинна бути повернута на кути  $\xi$  і  $\gamma$  (де  $\gamma$ - кут між лазерним променем, що опромінює мікрочастинки, і кутом  $\xi$  між електричними векторами лінійно поляризованого лазерного променя). Розсіяне випромінювання збирається всередині діафрагми з круглим отвором. Центральне положення приймальної діафрагми регулюється кутами  $\theta_0$  та  $\varphi_0$ . Положення точки прийому випромінювання в апертурній діафрагмі визначається кутом  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ .

Кути, на які розсіюється випромінювання від першого лазерного променя (для напрямку прийому в точці  $A_i$ ), будуть дорівнювати:

$$\theta_{1i} = \text{Arctg} \left( \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{z_1} \right), \quad (3.2)$$

$$\varphi_{1i} = \text{Arctg} \left( \frac{y_1}{x_1} \right)$$

Тепер треба знайти положення в просторі точки  $A_i$  в зоні прийому діафрагми, для цього треба повернути систему координат  $Ox_1y_1$  на кут  $\varphi_0$ , відносно  $Oz_1$ :

І вже координати точки  $A_1$  будемо виражати через нові координати, тобто:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1 \cos \varphi_0 - y_1 \sin \varphi_0, \\ y_1 &= x_1 \sin \varphi_0 + y_1 \cos \varphi_0, \\ z_1 &= z_1 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Другий поворот буде відносно осі  $Oy_1$  на кут  $\theta_0$ :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{x}_1 \cos \theta_0 - \dot{z}_1 \sin \theta_0, \\ \dot{y}_1 &= \dot{y}_1, \\ \dot{z}_1 &= -\dot{x}_1 \sin \theta_0 - \dot{z}_1 \cos \theta_0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Оскільки в результаті останнього обертання зона приймальної діафрагми стає паралельною площині, то можна знайти координати точки в системі координат і від них перейти до початкових координат.

Введемо заміну,

:

(3.5)

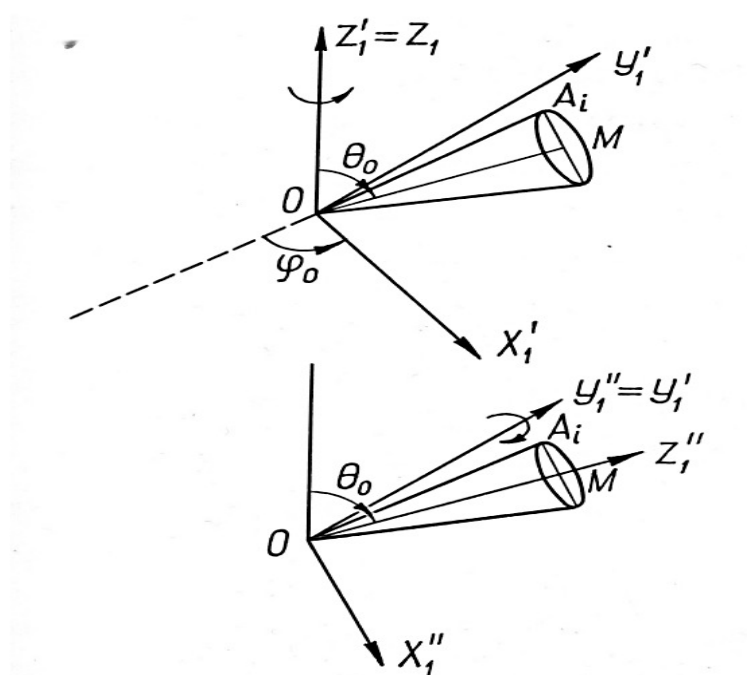


Рис.3.4. Перетворення систем координат для визначення кутів

в якому виходить розсіяне випромінювання від першого лазерного променя

Підставляючи вирази (3.4) в (3.3) та (3.5), маємо:

(3.6)

Кути, під якими розсіюються другі хвилі та другого променя лазерного променя, знаходимо за тією ж формулою (3.2), тобто підставляючи координати точки у другій системі координат :

Щоб визначити координати точки у другій системі координат, треба повернути систему координат на кут відносно осі :

(3.7)

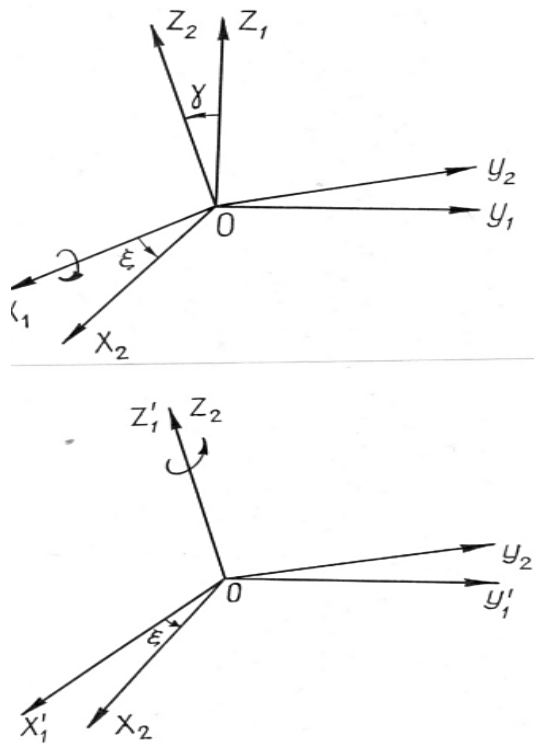


Рис.3.5. Перетворення системи координат для визначення кута де приймається розсіяне випромінювання від другого лазерного променя  
Після повороту системи координат на кут  $\xi$ , маємо:

(3.8)

Аналогічно, підставляючи вирази (3.6) в (3.7) знайдем координати точки А у другій системі координат:

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 \cos \xi + y_1 \cos \gamma \sin \xi + z_1 \cos \gamma \sin \xi \\y_2 &= -x_1 \sin \xi + y_1 \cos \gamma \cos \xi + z_1 \sin \gamma \cos \xi \\z_2 &= -y_1 \sin \gamma + z_1 \cos \gamma\end{aligned}\tag{3.9}$$

За відомими координатами точки  $A_i$  у першій системі координат та другій, за формулою (3.2) можна тепер визначити кути  $\theta_{1i}, \varphi_{1i}$  та  $\theta_{2i}, \varphi_{2i}$  відповідно де розповсюджуються перша та другі розсіяні хвилі.

Крім того, згідно з відомими мікрохвильовим параметром, з комплексним показником заломлення  $m$  і відомими значеннями кутів, можна знайти компоненти хвилі розсіювання для кожного напрямку прийому в апертурній діафрагмі за допомогою формули розсіювання Мі. Але, якщо буде умова  $r_i \gg \lambda$ , то складові хвиль від 2 лазерних променів будуть дорівнювати:

1)

$$E_{r1} = 0,$$

$$E_{\varphi 1i} = \frac{E_{10} e^{-jk_c r_i}}{k_c r_i} E_1(\theta_{1i}) \sin \varphi_{1i} e^{-j\delta_{1i}} e^{-jv_1 t}\tag{3.1}$$

0)

$$E_{\theta 1i} = \frac{E_{10} e^{-k_c r_i}}{k_c r_i} E_2(\theta_{1i}) \cos \varphi_{1i} e^{-j\delta_{2i}} e^{-jv_1 t}$$

2)

$$E_{r2} = 0,$$

$$E_{\varphi 2i} = \frac{E_{20} e^{-jk_c r_i}}{k_c r_i} E_1(\theta_{2i}) \sin \varphi_{2i} e^{-j\delta_{1i}} e^{-jv_2 t}\tag{3.1}$$

1)

$$E_{\theta 2i} = \frac{E_{20} e^{-k_c r_i}}{k_c r_i} E_2(\theta_{2i}) \cos \varphi_{2i} e^{-j\delta_{2i}} e^{-jv_2 t}$$

Де:  $E_{10}, E_{20}$ - модулі напруженості електричного поля променів,  $E_1(\theta_{2i}), E_1(\theta_{1i}), E_2(\theta_{2i}), E_2(\theta_{1i})$ - модулі комплексних амплітуд;  $\delta_{1i}, \delta_{2i}$  і  $\dot{\delta}_{1i}, \dot{\delta}_{2i}$ - початкова фаза складової хвилі розсіювання, яка дорівнює:

$$\dot{\delta}_{1i} = \text{Arctg} \frac{\text{Im}E_1(\theta_{1,i})}{\text{Re}E_1(\theta_{1,i})}, \quad \dot{\delta}_{2i} = \text{Arctg} \frac{\text{Im}E_2(\theta_{1,i})}{\text{Re}E_2(\theta_{1,i})}$$

$$\ddot{\delta}_{1i} = \text{Arctg} \frac{\text{Im}E_1(\theta_{2,i})}{\text{Re}E_1(\theta_{2,i})}, \quad \ddot{\delta}_{2i} = \text{Arctg} \frac{\text{Im}E_2(\theta_{2,i})}{\text{Re}E_2(\theta_{2,i})}$$

Частота розсіяного випромінювання дорівнює скалярному добутку вектора швидкості  $V$  мікрочастинок на різницю хвильових векторів розсіювання хвилі і лазерних променів  $\bar{k}_1$  та  $\bar{k}_2$

$$v_1 = \frac{1}{2\pi} (\bar{k}_s - \bar{k}_1) \bar{V},$$

$$v_2 = \frac{1}{2\pi} (\bar{k}_s - \bar{k}_2) \bar{V},$$

Модуль напруженості електричного поля лазерного променя пов'язаний з його потужністю:

$$E_{i0} = \sqrt{\frac{P_i}{\pi R_i^2 C} e^{-\frac{(x_i^2 + y_i^2)}{2R_i}}}$$

де:  $P_i$  - потужність лазерного променя в зоні вимірювання;  $R_i$  - радіус лазерного променя;  $x_i, y_i$ - координати мікрочастинок відносно центру лазерного променя;

Радіуси лазерних променів у зоні вимірювання потоку приймаємо рівним половині ефективного діаметра  $d_m$  зони вимірювання[27]. Ця область обмежена дифракцією випромінювання в точках, що відповідають рівню  $e^{-2}$  інтенсивності лазерного випромінювання в зоні вимірювання:

$$R_1 = R_2 = \frac{d_m}{2} = \frac{4\lambda_0 F}{\pi n_c D}$$



де:  $F$  - фокусна відстань лінзи, яка спрямовує лазерні промені в зону вимірювання;  $D$  - діаметр лазерного променя в задній фокальній площині лінзи;  $n_c$  - показник заломлення рідини.

Для подальшої роботи та визначення параметрів доплерівського сигналу ЛДВШ необхідно звести компоненти хвилі розсіювання в одну систему координат.

Компоненти хвиль розсіювання другого лазерного променя, який зводиться до першого компонента хвилі розсіювання, можна знайти за допомогою матриці зменшення:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{r3} \\ \dot{E}_{\varphi3} \\ \dot{E}_{\theta3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_{r2} \\ \dot{E}_{\varphi2} \\ \dot{E}_{\theta2} \end{bmatrix} \quad (3.1) \quad 2)$$

Запишемо декартові одиничні вектори, та сферичні у вигляді матриці стовпця:

$$L_x = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}$$

$$L(r) = \begin{bmatrix} l_r \\ l_\varphi \\ l_\theta \end{bmatrix}$$

Декартові координати можна перетворити на сферичні за допомогою матриці перетворення:

$$L(r) = AL(x).$$

Відповідно матриця приймає вид:

$$A = \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\varphi & \dots & \sin\theta\cos\varphi & \dots & \cos\theta \\ \cos\theta\cos\varphi & \dots & \cos\theta\sin\varphi & \dots & -\sin\theta \\ -\sin\theta & \dots & \cos\theta & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1) \quad 3)$$

За допомогою зворотної матриці, проводим перехід від сферичних до декартових координат:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\varphi & \dots & \cos\theta\cos\varphi & \dots & -\sin\theta \\ \sin\theta\sin\varphi & \dots & \cos\theta\sin\varphi & \dots & \cos\theta \\ \cos\theta & \dots & -\sin\theta & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

4)

Далі приведемо систему  $Ox_2y_2z_2$  до  $Ox_1y_1z_1$ :  $L(x_1) = KL(x_2)$

$$K = \begin{bmatrix} \cos\xi & \dots & -\sin\xi & \dots & 0 \\ \cos\gamma\sin\xi & \dots & \cos\gamma\cos\xi & \dots & -\sin\gamma \\ \sin\gamma\sin\xi & \dots & \sin\gamma\cos\xi & \dots & \cos\gamma \end{bmatrix}$$

Далі зробимо перехід від декартових координат до сферичних:

$$L(r_1) = A_1L(x_1) = A_1KL(x_2)$$

Таким чином, матриця зведення складових другої розсіяної хвилі до компонентів першої розсіяної хвилі матиме вигляд:

$$K = A_1KA_2^{-1}$$

Оскільки  $\dot{E}_r$  компоненти хвилі розсіяння дорівнює нулю, потрібні лише наступні елементи матриці:

$$b_{22} = c_{21}d_{12} + c_{22}d_{22} + c_{23}d_{32}$$

$$b_{23} = c_{21}d_{13} + c_{22}d_{23} + c_{23}d_{33}$$

$$b_{32} = c_{21}d_{13} + c_{22}d_{23} + c_{23}d_{33}$$

$$b_{33} = c_{31}d_{13} + c_{32}d_{23} + c_{33}d_{33}$$

Відповідно:

$$c_{21} = a_{21}k_{11} + a_{22}k_{21} + a_{23}k_{31}$$

$$c_{22} = a_{21}k_{12} + a_{22}k_{22} + a_{23}k_{32}$$

$$c_{23} = a_{21}k_{13} + a_{22}k_{23} + a_{23}k_{33}$$

$$c_{31} = a_{31}k_{11} + a_{32}k_{21} + a_{33}k_{31}$$

$$c_{32} = a_{31}k_{12} + a_{32}k_{22} + a_{33}k_{32}$$

$$c_{33} = a_{31}k_{13} + a_{32}k_{23} + a_{33}k_{33}$$

$a_{ij}, k_{ij}, d_{ij}$ - елементи матриць  $A_1, K, A_2^{-1}$ .

Тепер елементи матриці розсіювання буде дорівнювати:

$$c_{21} = \cos\theta_1 \cos\varphi_1 \cos\xi - \cos\theta_1 \sin\varphi_1 \sin\xi + \sin\theta_1 \sin\varphi_1 \sin\xi$$

$$c_{22} = \cos\theta_1 \cos\varphi_1 \sin\xi - \cos\theta_1 \sin\varphi_1 \cos\xi \cos\gamma + \sin\theta_1 \cos\xi \sin\gamma$$

$$c_{23} = -\cos\theta_1 \sin\varphi_1 \sin\gamma - \sin\varphi_1 \cos\gamma$$

$$c_{31} = -\sin\theta_1 \cos\xi + \cos\theta_1 \cos\gamma \sin\xi$$

$$c_{32} = -\sin\theta_1 \sin\xi + \cos\theta_1 \cos\gamma \cos\xi$$

$$c_{33} = -\sin\theta_1 \cos\gamma \cos\xi + \cos\theta_1 \sin\gamma$$

$$d_{12} = \cos\theta_2 \cos\varphi_2, d_{13} = \cos\theta_2 \sin\varphi_2, d_{32} = -\sin\theta_2,$$

$$d_{13} = -\sin\theta_2, d_{23} = \cos\theta_2, d_{33} = \sin\theta_2$$

Отже, за допомогою описаної вище формули можна розрахувати кут поширення для кожного напрямку прийому розсіяного випромінювання. Тоді можна за формулою (3.10) розрахувати компоненти розсіяних хвиль від першого і другого лазерних променів і звести їх в одну систему координат за допомогою матриці (3.12).

Таким чином, для кожного напрямку прийому визначаються розсіяні хвилі двох лазерних променів, що зводяться до єдиної системи координат.

Кожна розсіяна хвиля має власну інтенсивність, стан поляризації та початкову фазу. Сума цих «базових» оптичних сигналів формує інтерференційну картину на поверхні фотоприймача і сумарний оптичний сигнал приладу.[28]

## РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ОПТИЧНОГО ПРИЛАДУ НАДМАЛИХ ОБ'ЄМНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

### 4.1. Особливості зміни фази

Для дослідження розглянемо випадок, коли прийом розсіяного випромінювання здійснюється під невеликим кутом діафрагми, де інтенсивність і стан поляризації можна вважати незмінними. Тоді амплітуда і фаза «елементарного» сигналу, що формується на виході фотоприймача, буде дорівнювати:

$$U_{di} = \frac{enk}{h\nu} = RC\Delta S_i \sqrt{E_{\varphi 1}^2 E_{\varphi 2}^2 + E_{\theta 1}^2 E_{\theta 2}^2 + 2E_{\varphi 1}^2 E_{\varphi 2}^2 E_{\theta 1}^2 E_{\theta 2}^2 \cos(\Delta_{1i} - \Delta_{2i})} \cos(\omega_d + \varphi_{di})$$

$$\varphi_{di} = \text{Arctg} \left( \frac{E_{\varphi 1}^2 E_{\varphi 2}^2 \sin \Delta_{1i} + E_{\theta 1}^2 E_{\theta 2}^2 \sin \Delta_{2i}}{E_{\varphi 1}^2 E_{\varphi 2}^2 \cos \Delta_{1i} + E_{\theta 1}^2 E_{\theta 2}^2 \cos \Delta_{2i}} \right)$$

Через те, що «базовий» доплерівський сигнал має різні фази, то загальний доплерівський сигнал на виході фотоприймача буде зменшуватися через несфазованості сигналу.

Ступінь узгодження сигналу з фазою оцінюється за допомогою коефіцієнту

$$k_f = \frac{|\int \sqrt{k_{pi} I_{s1i} I_{s3i}} e^{-j\varphi_{di}} d\Omega|}{|\int \sqrt{k_{pi} I_{s1i} I_{s2i}} d\Omega|}$$

НАУ. 22. 01 .55 000 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			
					РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ОПТИЧНОГО ПРИЛАДУ РЕЄСТРАЦІЇ НАДМАЛИХ ОБ'ЄМНИХ ДЕФОРМАЦІЙ		
Розроб.		Савранський В.А.			Лім.	Аркуш	Аркушіє
Перевір.		Дивнич М.П.					
Реценз.					ФАЕТ- 214 гр.		
Н. Контр.		Дивнич М.П.					
Затверд.		Мельник Ю.В.					

Але, для зменшення впливу несфазованості доплеровських сигналів треба дослідити зміни їх, в залежності від напрямку прийому розсіяного випромінювання.

Відомо, що якщо лазерні промені мають лінійний стан поляризації і їх електричні вектори перпендикулярні до площини променів, то амплітуда і фаза «елементарних» доплерівських сигналів змінюються наступним чином.

Для подальшого дослідження розглянемо на прикладі, коли прийом розсіяного випромінювання здійснюється в 2 напрямках:

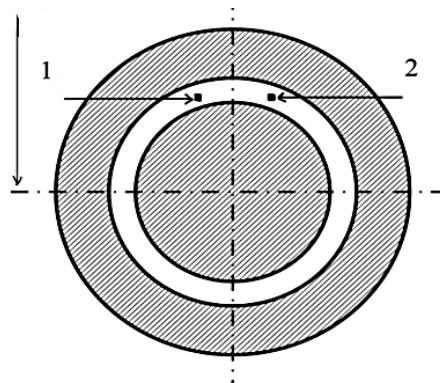


Рис.4.1. Приймальна діафрагма, що має форму кільця

Ці напрямки прийому розташовані симетрично один одному до площини, де проходить через бісектрису кута між лазерними променями і перпендикулярна до площини, в якій розташовані промені. У цьому випадку на виході фотоприймача будуть формуватися «елементарні» сигнали з однаковою амплітудою і однаковими фазами.

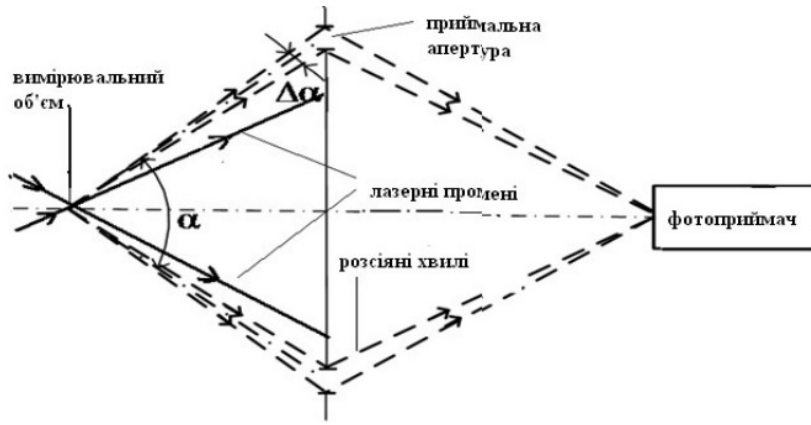


Рис.4.2. Спрощена схема прийому розсіяного випромінювання в отвори у вигляді вузького кільця

Для напрямків прийому 1 і 2, симетричних оптичній осі приладу, кути розповсюдження розсіяних хвиль змінюються ( $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2; \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2$ ). Тоді, відповідні амплітуди доплерівських сигналів для таких напрямків будуть:

$$\dot{U}_{di} = \frac{enk}{hv} = RC\Delta S_i \sqrt{E_{\varphi_1}^2 E_{\varphi_2}^2 + E_{\theta_1}^2 E_{\theta_2}^2 + 2E_{\varphi_1}^2 E_{\varphi_2}^2 E_{\theta_1}^2 E_{\theta_2}^2 \cos(\Delta_{1i} - \Delta_{2i})} \cos(\omega_d + \varphi_{di})$$

$$\ddot{U}_{di} = \frac{enk}{hv} = RC\Delta S_i \sqrt{E_{\varphi_1}^2 E_{\varphi_2}^2 + E_{\theta_1}^2 E_{\theta_2}^2 + 2E_{\varphi_1}^2 E_{\varphi_2}^2 E_{\theta_1}^2 E_{\theta_2}^2 \cos(\Delta_{1i} - \Delta_{2i})} \cos(\omega_d + \varphi_{di})$$

А, так як різниці фаз між складовими розсіяних хвиль в напрямках прийому будуть мати вже протилежні знаки, то фази сигналів будуть приймати такі значення:

$$\dot{\varphi}_{di} = \text{Arctg} \left( \frac{E_{\varphi_1}^2 E_{\varphi_2}^2 \sin \Delta_{1i} + E_{\theta_1}^2 E_{\theta_2}^2 \sin \Delta_{2i}}{E_{\varphi_1}^2 E_{\varphi_2}^2 \cos \Delta_{1i} + E_{\theta_1}^2 E_{\theta_2}^2 \cos \Delta_{2i}} \right)$$

$$\ddot{\varphi}_{di} = \text{Arctg} \left( \frac{E_{\varphi_1}^2 E_{\varphi_2}^2 \sin(-\Delta_1) + E_{\theta_1}^2 E_{\theta_2}^2 \sin(-\Delta_2)}{E_{\varphi_1}^2 E_{\varphi_2}^2 \cos(\Delta_1) + E_{\theta_1}^2 E_{\theta_2}^2 \cos(-\Delta_2)} \right)$$

При прийомі розсіяного випромінювання в межах  $\Delta\Omega$ , фаза і коефіцієнти узгодження «елементарного» доплерівського сигналу відповідно дорівнюють:

$$\varphi_d = \text{Arctg} \left[ \frac{\int (U_{di} \sin \varphi_{di} d\Omega)}{\int U_{di} \sin \varphi_{di} d\Omega} \right].$$

$$k_f = \left[ \left| \int U_{di} e^{-j\varphi_{di}} d\Omega \right| / \int U_{di} d\Omega \right]$$

При прийомі розсіяного випромінювання в кільці, центр якого лежить на бісектрисі кута між лазерними променями, фаза доплерівського сигналу буде приймати  $0^\circ$  та  $180^\circ$ .

Це пояснюється тим, що для двох півкілець, симетричних бісектрисі кута між лазерними променями, фази доплерівських сигналів мають протилежні знаки, а їх амплітуди рівні. Фаза сигналу буде дорівнювати  $\varphi_d = 180^\circ$  тоді, коли сума «елементарних» фазованих сигналів  $90^\circ < \varphi_d < 270^\circ$  буде перевищувати суму фазованих сигналів. [29]

Таким чином, коли кутова апертура  $9^\circ$  прямого розсіювання і при куті між лазерними променями  $14^\circ$  буде низьке значення коефіцієнта глибини модуляції доплерівського сигналу, що зумовлено низьким значенням коефіцієнта узгодження «елементарних» доплерівських сигналів ( $k_f=0.04$ ). Відповідно, при збільшенні кутової апертури, буде спостерігатися падіння. Зі збільшенням спочатку спостерігається падіння  $k_f$  з 1 до 0 при  $\alpha=4,1^\circ$ , ступінь фазового узгодження в міру відкриття діафрагми зростає, а потім знову падає.

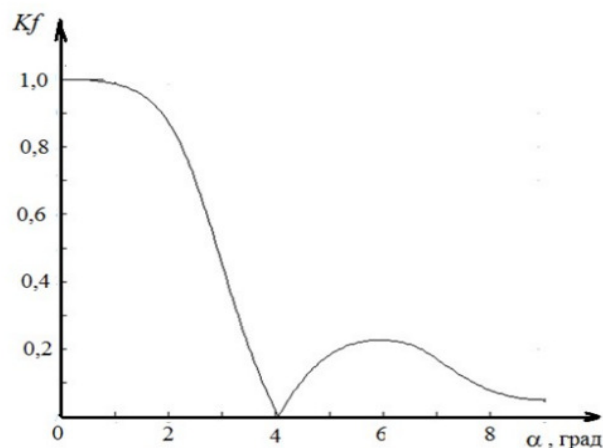


Рис.4.3. Залежність  $k_f = f(\alpha)$  від величини кута апертури

Якщо прийом розсіяного випромінювання здійснюється всередині кільця, то фаза доплерівського сигналу буде дорівнювати нулю, при  $0 < 2\alpha < 4,1^\circ$ .

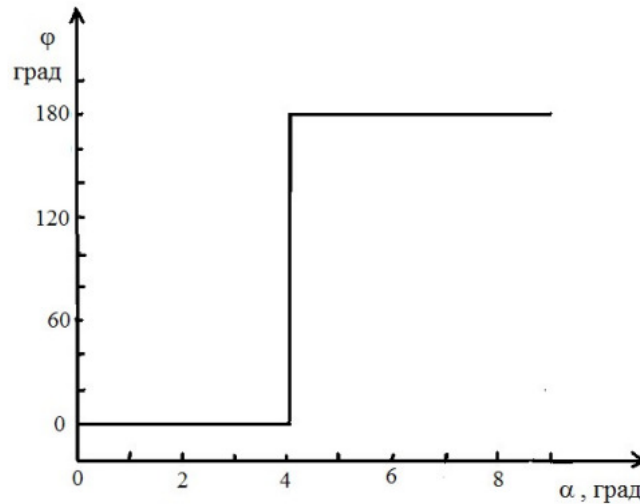


Рис.4.4. Залежність фази при прийомі випромінювання в межах вузького кільця  $\Delta\alpha = 1'30''$  від величини апертурного кута

Зменшення глибини модуляції доплерівського сигналу при прийомі розсіяного випромінювання в діафрагмі з круглим отвором викликано двома факторами.

По-перше, відбувається зниження ступеня фазового узгодження «елементарних» доплерівських сигналів, які утворюються при прийомі розсіяного випромінювання в межах кільцевої апертури під кутом  $\Delta\alpha$ .

У діафрагмі апертури є зони, де прийом призводить до доплерівських сигналів, які не збігаються по фазі з вихідним сигналом фотодетектора. Для розглянутого прикладу доплерівські сигнали надходять у діапазоні кутів  $\alpha$  від  $0^\circ,05$  до  $4^\circ,05$  і мають фазу  $\varphi_d = 0^\circ$ , при діапазоні  $(4^\circ,1;9^\circ)$  має фазу  $\varphi_d = 180^\circ$ .

Таким чином, доплерівські сигнали, створені при прийомі розсіяного випромінювання в діапазоні кутів  $\alpha$  ( $0^\circ,05$  до  $4^\circ,05$ ), знаходяться в протифазі з доплерівськими сигналами, створеними при прийомі розсіяного випромінювання в діапазоні кутів ( $4^\circ,1$  до  $9^\circ$ ).

Для розрахунку потрібні наступні параметри оптичної схеми приладу:

- потужність і довжина хвилі лазера ( $P, \lambda$ )
- кут між лазерними променями;



- кути, що визначають центральне положення приймальної діафрагми ( $\theta_0$  та  $\varphi_0$ )
- коефіцієнт підсилення та вихідний опір фотоприймача;
- пропускна здатність фільтра, встановленого на виході фотоприймача;
- діаметр об'єму вимірювання;
- розмір апертури приймальної оптики  $\alpha$
- діаметр мікрочастинки  $d$  та показник заломлення мікрочастинки  $m$ ;

Фазу доплерівського сигналу необхідно визначити для кожного кільця, визначеного малим кутом ( $\Delta\alpha$ ), залежно від величини самого кута. Після використання цих розрахунків визначається зона, де фаза доплерівського сигналу приймає значення  $0^\circ$  або  $180^\circ$  необхідно провести додаткові розрахунки.

Далі розрахувати коефіцієнт глибини модуляції доплерівського сигналу та відношення сигнал/шум окремо для зон прийому, де сигнали є синфазними.

І, для збільшення глибини модуляції доплерівського сигналу шляхом узгодження сигналів по фазі можна використовувати діафрагму з меншим кутом  $\alpha = 3^\circ,75$  (коефіцієнт глибини модуляції сигналу збільшиться з 0,02 до 0,36).

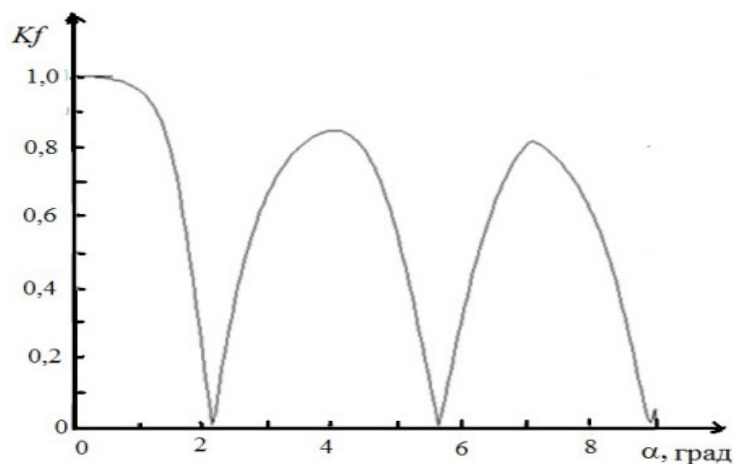


Рис.4.5. Залежність  $k_f=f(\alpha)$  від величини кута

З графіку можна бачити, що коефіцієнт узгодження  $k_f$  падає від 1 до 0,01, при збільшенні до  $2^\circ$ , потім зростає до 0,84 при  $\alpha = 4^\circ$ . Далі падає майже до нуля ( $k_f = 0,008$ ;  $\alpha = 5,6^\circ$ ). Надалі спостерігається підвищення рівня фазового

узгодження сигналу(  $k_f = 0,81$ ;  $\alpha = 7^\circ$ ), крім того, швидкість узгодження фази знову падає вже  $\alpha = 9^\circ$ .

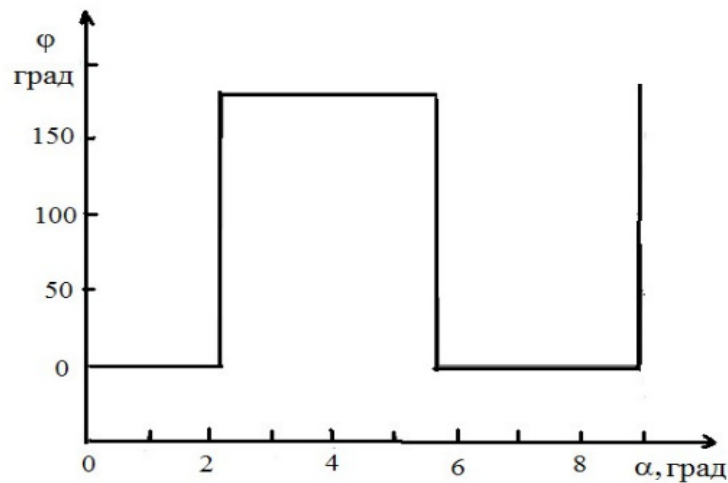


Рис.4.6. залежність фази при прийомі випромінювання в межах  $\Delta\alpha = 1^\circ 30''$  від величини кута апертури

Як видно, доплерівський сигнал, коли він приймає випромінювання розсіювання в двох кільцях спочатку від  $0$  до  $\alpha = 2^\circ,15$  а інше від  $5^\circ,65$  до  $8,9^\circ$  мають фазу нуль. Але, коли сигнал при прийомі випромінювання всередині кільцевих діафрагм під кутом  $\alpha = 2^\circ,25$  до  $5^\circ,65$  і  $\alpha = 8^\circ,7$  до  $9^\circ,7$  мають  $180^\circ$ .

Це також викликає зниження ступеня узгодження фази сумарного доплерівського сигналу.

Таким чином, доплерівські сигнали від різних кілець діафрагми також знаходяться в протифазі. А отже, призводить до низької глибини модуляції та співвідношення сигнал/шум.[29]

#### **4.2. Розробка функціональної схеми оптичного приладу реєстрації надмалих об'ємних деформацій**

На характер зміни фази сигналу впливає діаметр мікрочастинки, та її оптичні властивості, що визначаються комплексним показником заломлення.

Важливим параметром сигналу оптичного приладу реєстрації надмалих об'ємних деформацій є коефіцієнт його глибини модуляції, який можна

знаходиться як добуток коефіцієнтів амплітудного узгодження, поляризаційного узгодження розсіяних хвиль та фазового узгодження сигналів:

$$k_m = k_a k_p k_f$$

Прийом випромінювання в певних зонах апертурної діафрагми приводить до формування сигналів у проти фазі. Тому при розсіянні на мікрочастинках певного діаметру доплерівські сигнали взаємно компенсуються та коефіцієнт глибини модуляції сумарного сигналу дорівнює нулю.

Так, на рис.4.7 показана залежність коефіцієнта глибини модуляції сигналу від діаметру мікрочастинок полістиролу.[30]

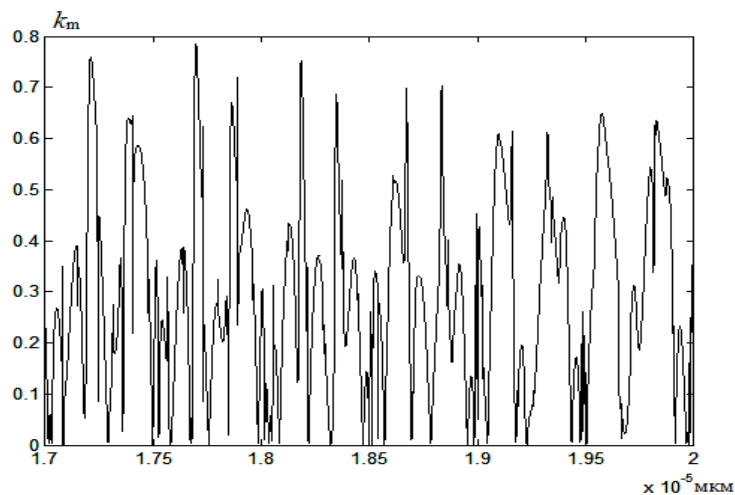


Рис.4.7 Залежність коефіцієнта глибини модуляції доплерівського сигналу від діаметру мікрочастинок полістиролу  $k_m = f(d)$ .

Як видно з представленого графіку для деяких розмірів мікрочастинок коефіцієнт модуляції а отже і змінна складова сигналу на виході фотоприймача дорівнює нулю. Окрім цього спостерігається суттєва зміна глибини модуляції в залежності від діаметру мікрочастинок.

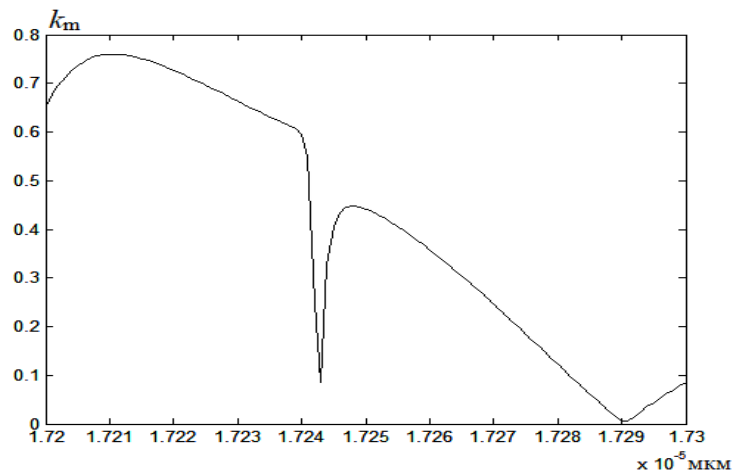


Рис.4.8. Залежність  $k_m = f(d)$ . Розрахунки проведені з кроком  $\Delta d=10$  нм.

В діапазоні зміни розмірів від 17,2 до 17,3 мкм  $\Delta d=0,1$  мкм коефіцієнт модуляції змінюється від 0,75 до 0. Причому графік має два мінімуми.

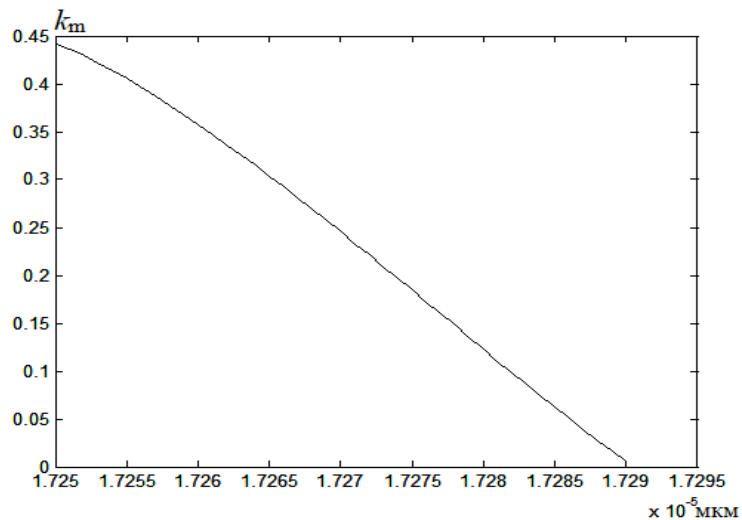


Рис.4.9. Залежність  $k_m = f(d)$ . Розрахунки проведені з кроком  $\Delta d=0,5$  нм.

Розрахунки з меншим кроком зміни діаметру  $\Delta d=0,5$  нам показали наступне. Зі збільшенням діаметру мікрочастинки від 17,250 мкм до 17,290 мкм ( $\Delta d=40$  нм) коефіцієнт глибини модуляції падає з  $k_m=0,44$  до нуля. Таким чином відношення  $\Delta k_m/\Delta d$  дорівнює 0,11 на 10 нм. Якщо амплітуда доплерівського сигналу буде дорівнювати 1 В (при коефіцієнті глибини модуляції  $k_m = 1$ ), то будемо мати чутливість приладу до зміни діаметра

мікрочастинки 110 мВ на 10 нм, або 11 мВ на 1нм. Таким чином таким методом можна реєструвати об'ємну деформацію у 1 нм.

Для практичної реалізації запропонованого методу потрібно:

1. Розмістити мікрочастинку у прозорій речовині, що має певні пружні властивості. Наприклад у кубіку зі скла, полікарбонату.

2. Для отримання доплерівського сигналу на виході фотоприймача потрібно один з лазерних променів зсунути за частотою.

3. Так як практично неможливо вибрати мікрочастинку такого діаметру, при розсіянні на якій коефіцієнт глибини модуляції буде дорівнювати нулю, то необхідно змінювати величину апертурної діафрагми, до того моменту коли  $k_m=0$ . При такій кутовій апертурі буде відбуватися взаємна компенсація двох сигналів, що знаходяться у проті фазі. На рис.4.10 показано, що взаємна компенсація відбувається при апертурному куті  $\alpha=4^\circ$ .

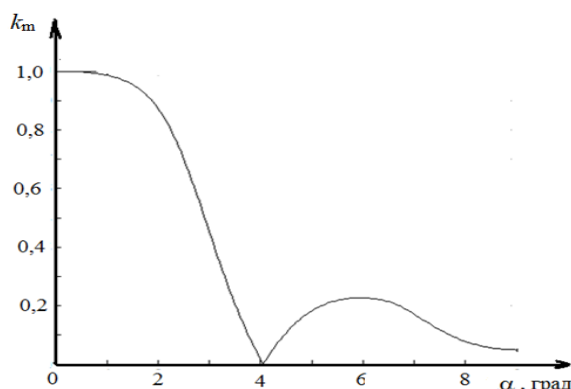


Рис.4.10. Залежність коефіцієнта глибини модуляції сигналу від апертурного кута, в якому збирається розсіяне випромінювання  $k_m = f(\alpha)$ .

Для цього у перехресті лазерних променів потрібно розташувати кубик. Кубик повинен містити пухирець, який виконує функцію мікрочастинки. Пухирець може мати діаметр від 10 до 100 мкм.

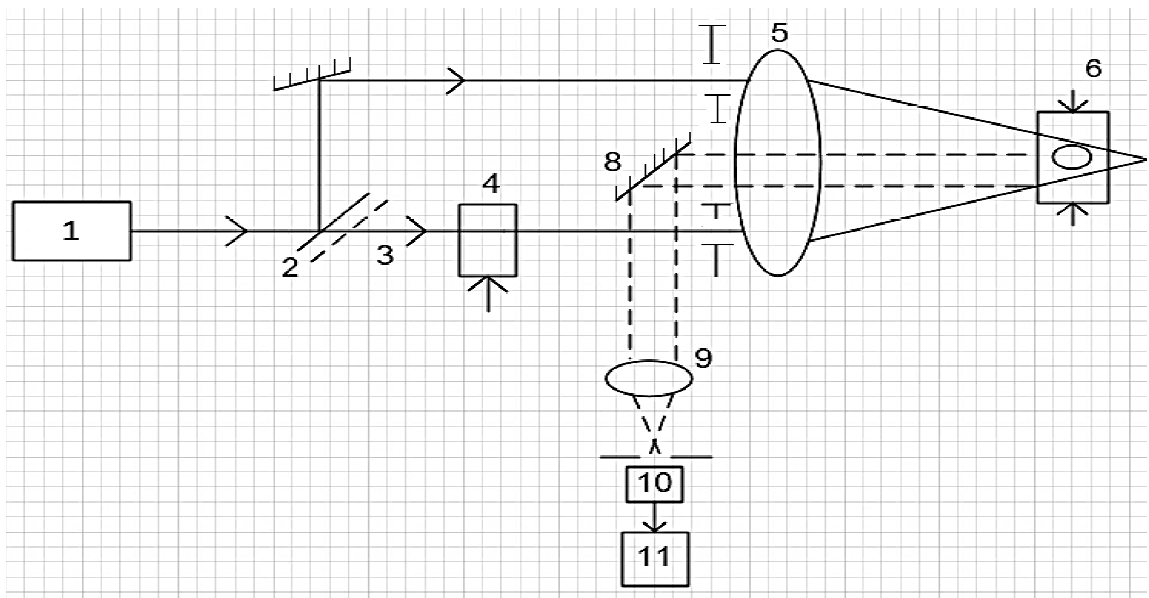


Рис.4.11 Функціональна схема реєстрації надмалих об'ємних деформацій

В цьому приладі випромінювання лазера 1 напівпрозорим дзеркалом 2 поділяється на два променя 3 та 4. Промінь 3 проходить пристрій зсуву частоти 4 та направляється до об'єктиву 5. За допомогою об'єктиву 5 промені 3 та 4 фокусуються у прозорому кубку 6.

Розсіяне лазерне випромінювання на цьому пухирці збирається об'єктивом 5, проходить діафрагму 7 та відбивається від дзеркала 8. Відбите від дзеркала розсіяне випромінювання за допомогою об'єктиву 9 направляється на фотоприймач 10.

Вихідний сигнал фотоприймача за рахунок того, що один лазерний промінь зсунутий за частотою містить змінну складову.

Сигнал з фотоприймача направляється на вимірювач коефіцієнта глибини модуляції 11.

Діафрагма 7 має отвір, діаметр якого можна змінювати. Регулюючи отвір діафрагми потрібно добитись, того щоб коефіцієнт глибини модуляції дорівнював нулю. Це буде у тому випадку коли доплерівські сигнали з протилежними фазами мають однакову амплітуду.

При деформації пухирця, змінюється його діаметр і коефіцієнт глибини модуляції вихідного сигналу фотоприймача буде збільшуватись.

Чутливість приладу складає 11мВ на 1 нм, або можна реєструвати об'ємні деформації в 0,1 нм, тоді сигнал зміниться на 1100 мкВ, або 0,01 нм. Зміна діаметру пухирця на  $1 \cdot 10^{-11}$  м ( або 0,01 нм) призведе до зміни сигналу приладу на 110 мкВ. Такі надмалі об'ємні деформації такого ж порядку як розміри молекул та атомів, наприклад молекул води, кисню, азоту (0,2-0,35 нм).

Якщо у оптичному приладі використовувати кубик зі скла, в якому розташований пухірець повітря, що виконує функцію мікрочастинки, то він може реєструвати зміну температури  $\Delta T = 0,25 \cdot 10^{-3} K^\circ$  або зміну напруженості  $\Delta E = 0,5 Pa$ . Такий оптичний прилад може застосуватись для реєстрації зміни напруженості гірських порід з метою запобігання їх раптового викиду.[31]

## РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1. Положення про охорону праці

Охорона праці - це система правових, нормативних, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Охорона праці спирається на комплекс державних законодавчих актів. Загальними законами України, що визначають основні положення щодо охорони праці і спираються на Конституцію України, Кодекс законів про працю, Закон

України "Про охорону праці", Закон України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення", Закон України "Про пожежну безпеку", Закон України "Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис
Розроб.		Савранський Б.А.	
Певені	України	"Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від	
Реценз.			
Н. Контр.	Дивнич М.П.		
Затверд.	Мельник Ю.В.		

НАУ.22.01.47-000113

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Літ. Аркуш Аркуші

ФАЕТ- 214 гр.

нешасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності” та підзаконні акти щодо охорони праці.

## **5.2. Фактори ризику на виробництві**

Небезпечними факторами життя називають ті чинники життєвого середовища, що призводять до травм, опіків, обморожень, пошкодження організму або окремих його органів і навіть раптової смерті.

Хоча поділ вражаючих факторів на небезпечні та шкідливі досить умовний, оскільки іноді неможливо віднести фактор до тієї чи іншої групи, він ефективно використовується в охороні праці для організації розслідування та звітності про нещасні випадки та професійні захворювання, налагодити роботу, спрямовану на розробку заходів і засобів захисту працівників, профілактики травматизму та захворювань на виробництві.

## **5.3. Класифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів**



Шкідливий виробничий фактор виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я зниження працездатності працівника. Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого за певних умов може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника.[32]

**До фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать:**

- рухомі машини та механізми;
- пересувні частини виробничого устаткування;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- підвищення або зниження температури поверхонь обладнання, матеріалів або повітря в робочій зоні; підвищений рівень шуму, вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих випромінювань, статичної електрики, електромагнітних випромінювань, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації;
- підвищення або зниження барометричного тиску, вологості, іонізації та рухливості повітря;
- небезпечне значення напруги в електричному ланцюзі; підвищена інтенсивність електричних або магнітних полів;
- відсутність чи нестача природного світла;
- недостатнє освітлення робочої зони; збільшення яскравості світла; пряме і відбите випромінювання, що створює ефект засліплення.

**До хімічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать хімічні речовини, які за характером дії на організм людини поділяються на:**

- загальнотоксичні,
- подразнюючі;
- сенсibiliзуючі,
- канцерогенні,
- мутагенні,
- такі, що впливають на репродуктивну функцію.

**До біологічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів** належать патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, мікроскопічні гриби та ін.), в тому числі продукти їх життєдіяльності, а також макроорганізми (рослини і тварини).

Небезпечні і шкідливі виробничі фактори за характером їх дії в просторі поділяють на:

- постійно локалізовані в джерелі свого виникнення;
- локалізовані в звичайних ситуаціях, але розосереджені (переміщуються, поширюються) у просторі виробничого середовища в надзвичайних ситуаціях;
- поширюються разом з рухом повітря у виробничому середовищі;
- поширюються (переміщення) виробничим середовищем або іншим простором у вигляді матеріальних об'єктів, у тому числі газових струменів;
- поширюються (пронизують) виробниче середовище випромінювання.

По безпосередності свого впливу небезпечні і шкідливі виробничі фактори поділяють на:

- які безпосередньо впливають на організм працюючої людини;
- фактори, що опосередковано впливають на організм працюючої людини і безпосередньо впливають на організм працюючої людини.

#### **5.4. Нормування лазерного випромінювання**

Санітарними нормами встановлюється гранично допустимий рівень лазерного опромінення (ГДР ЛВ) рогівки, сітківки ока і шкіри. За ГДР приймається енергетична експозиція  $H$ , Дж/см<sup>2</sup>, тобто відношення енергії випромінювання до площі поверхні, яка опромінюється. ГДР залежить від наступних параметрів:

- довжини хвилі,  $\lambda$ , нм;
- тривалості імпульсу,  $\tau$ , с;
- частоти повторення імпульсів,  $f$ , Гц;
- тривалості дії,  $t$ , с;
- діаметра зіниці ока,  $d_3$ , см;

- фонові освітленості ро́гівки,  $\Phi_p$ , лк.

#### **5.4.1. Визначення гранично допустимого лазерного рівня випромінювання при взаємодії зі шкірою та очима людини**

Гранично допустимий рівень лазерного випромінювання визначається по-різному для різних умов впливу

- одноразова дія, що відповідає випадковій експозиції випромінювання тривалістю не більше  $3 \cdot 10^4$ с

Тоді гранично допустимим рівнем одноразового опромінення є той рівень випромінювання, під впливом якого маломожлива поява оборотних відхилень в організмі працівника.

- хронічне опромінення, що відповідає систематичному повторенню опромінення, якому піддаються люди, професійно пов'язані з лазерним випромінюванням

Тобто, це такі рівні випромінювання, вплив яких при певній тривалості роботи протягом усього трудового стажу не призводить до ушкодження (пошкодження), захворювання або відхилення в стані здоров'я працівника під час роботи або у віддалений період життя нинішніх і майбутніх поколінь.

При визначенні гранично допустимого лазерного рівня випромінювання розглядається випадок опромінення одним імпульсом і серією імпульсів. Але в разі серії імпульсів грає роль тривалість одного імпульсу, а в разі серій — частота проходження імпульсу. Також під час нормалізації гранично допустимого рівня лазера параметри променя(пучка) випромінювання можуть відігравати роль у випромінюванні:

- колімоване лазерне випромінювання утримується в замкнутому тілесному куті, при якому спостерігається прямий або дзеркально відбитий промінь (тобто відбитий під кутом, рівним куту падіння);

- неколімоване лазерне випромінювання виникає в разі розсіювання або дифузного відбиття.

Розсіяне лазерне випромінювання відхиляється на поверхні або всередину середовища так, що воно змінює просторовий розподіл і відразу ж розподіляється в різних напрямках (без зміни довжини хвилі випромінювання). Але якщо випромінювання відбивається від поверхні, пропорційно довжині хвилі і спрямоване в різні боки в межах півкулі, то виникає дифузно відбите лазерне випромінювання.

Джерелом випромінювання може бути довгий (протяжний) об'єкт, тобто кутовий розмір джерела лазерного випромінювання більше граничного кута. Така ситуація може виникнути в разі дифузного відбиття лазерного випромінювання.

Тоді гранично допустимий рівень лазерного випромінювання залежить від величини кута зору  $\alpha$  з цього джерела. Відома кутова міра джерела випромінювання, що зазвичай визначається за виразом:

$$\alpha = \frac{2}{l} \sqrt{\frac{S_0 \cos \theta}{\pi}} \quad (5.1)$$

де  $S_0$  - площа джерела,  $\text{м}^2$ ;  $l$  - відстань від точки спостереження до джерела, м;  $\theta$  - кут між нормаллю до поверхні джерела і напрямом візування, рад. Граничний кут відповідає величині вихідного кута, де останній можна вважати точкою.

Нормованими параметрами лазерного випромінювання є енергія експозиції  $H$  і енергія освітленості  $E$ , усереднені яких обмежує по апертурі. До таких параметрів також належать енергія  $W$  і потужність  $P$  випромінювання, що проходить через граничний отвір. При дії лазерного випромінювання на шкіру в будь-якому діапазоні або на очі в певному діапазоні визначається гранично допустимий рівень енергетичного впливу та освітленості  $E_{\text{гдр}}$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), усереднення проводиться по граничному діаметру отвору  $1.1 * 10^{-3}$  м. Але, при впливі на очі

діапазоні II нормуються енергія  $W$  та потужність  $P_{\text{гдр}}$  лазерного випромінювання усереднення здійснюється по діафрагмі ( $7 * 10^{-3}$ ) м.[33]

#### 5.4.2. Розрахунок природного освітлення робочого місця персоналу

Розрахуємо природне освітлення лабораторії перевірки обладнання. Джерелом природного освітлення на робочому місці є 2 вікна розміром 1,25x1.5 метри. Його площа 40 кв. метрів.

1. Розраховуємо нормоване значення коефіцієнту природного освітлення (КПО) для заданих умов:

$$(\text{КПО})_N = (\text{КПО})_{\text{норм.}} * m_N$$

1) Визначаємо сумарну площу вікон:  $S_{\text{вік}} = 2 * 1,25 * 1,5 = 3,75 \text{ м}^2$  ;

2) Визначаємо площу підлоги:  $S_{\text{підл}} = 5 * 6 = 30 \text{ м}^2$ ;

3) Вираховуємо відносну площу світлових прорізів  $\alpha$ :  $\alpha = S_{\text{вік}} / S_{\text{підл.}} * 100 = 3,75/30 * 100 = 12.5\%$

По таблиці «Рекомендовані значення відносної площі світлових прорізів для виробничих приміщень» визначаємо, що в цьому приміщенні можна запланувати виконання зорової роботи середньої точності, що відповідає IV розряду зорової роботи. По таблиці встановлюємо, що найменший розмір об'єкта розрізнення для цього розряду становить менше 0,5мм.

Нормоване значення коефіцієнта природного освітлення для IV розряду зорової роботи  $(\text{КПО})_{\text{норм.}} = 1,5\%$ . Для IV поясу світлового клімату (м. Київ) та для орієнтації вікон на північний захід коефіцієнт світлового клімату становить  $m_N = 0,85$ .

$$(\text{КПО})_N = (\text{КПО})_{\text{норм.}} * m_N = 1.275\%$$

Виконаємо перевіірочний розрахунок бокового природного освітлення методом світлового коефіцієнта. Розрахунок проводиться по такій формулі:

$$S_{\text{вік}} / S_{\text{підл}} 100 * = ((\text{КПО})_N * K_3 * \eta_B * K_{\text{БУД}}) / \tau_{\text{заг}} * r_l$$

де  $S_{\text{вік}}$  – площа вікон;  $S_{\text{підл}}$  – площа підлоги;  $(\text{КПО})_N$  - нормоване значення КПО;  $K_3$  – коефіцієнт запасу;  $\eta_B$  – світлова характеристика вікон;  $K_{\text{БУД}}$  – коефіцієнт, що враховує затінення вікон будівлями, розташованими навпроти;  $\tau_{\text{заг}}$  – загальний коефіцієнт світлопропускання світлових прорізів;  $\tau_1$ –коефіцієнт, що враховує підвищення КПО завдяки світлу, яке відбивається від поверхонь приміщення.

Для приміщення з нормальними умовами середовища  $K_3 = 1,2$ . Тепер знаходимо світлову характеристику вікон  $\eta_B$ . Для того, щоб знайти це значення по нам знадобляться геометричні параметри приміщення:

$L$ –довжина приміщення (6 м);

$B$ –глибина приміщення (5 м);

$h$ –висота від рівня робочої поверхні до верхнього краю вікна ( $1+1,25 - 0,8 = 1,45$  м, де 1м – висота підвіконня, 0,8м – висота умовної робочої поверхні, 1,25м – висота вікон);

Використовуючи значення знаходимо наступні відношення:

$$L/B = 6/5 = 1,3; B/h = 5/1,45 = 3,44. \text{ Отже, } \eta_B = 15.$$

Визначаємо коефіцієнт  $K_{\text{БУД}}$ , що враховує затінення вікон будівлями.  $K_{\text{БУД}} = 1,0$ .

Розрахуємо далі загальний коефіцієнт світлопропускання світлових прорізів  $\tau_{\text{заг}}$ . Він визначається по формулі:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3,$$

де  $\tau_1$  – коефіцієнт світло пропускання матеріалу вікон;  $\tau_2$  – коефіцієнт, що враховує втрати світла у віконній рамі;  $\tau_3$  - коефіцієнт, що враховує втрати світла у сонцезахисних пристроях.

Вікна мають регульовані внутрішні жалюзі, виготовлені з одинарних металевих рам, в яких вставлене віконне листове подвійне скло. Маємо такі значення:  $\tau_1 = 0,8$ ,  $\tau_2 = 0,75$ ,  $\tau_3 = 1$ . Розраховуємо  $\tau_{\text{заг}} = 0,8 * 0,75 * 1 = 0,6$

Приступимо до розрахунку коефіцієнта  $r_1$ , що враховує підвищення КПО завдяки світлу, яке відбивається від поверхонь приміщення. Він залежить від геометричних параметрів приміщення та середнього коефіцієнта відбиття внутрішніх поверхонь приміщення.

Спершу додатково знайдемо відношення  $b/B$ , (де  $b$  – відстань від розрахункової точки М робочої поверхні до зовнішньої стіни приміщення):

$b/B = 4/5 = 0,8$ . Середнє значення коефіцієнту відбиття вираховується по наступній формулі:

$$\rho_{\text{сер}} = \frac{\rho_{\text{стелі}}S_{\text{стелі}} + \rho_{\text{стіни}}S_{\text{стіни}} + \rho_{\text{підлоги}}S_{\text{підлоги}}}{S_{\text{стелі}} + S_{\text{стіни}} + S_{\text{підлоги}}}$$

де  $S_{\text{стелі}}$ ,  $S_{\text{стіни}}$ ,  $S_{\text{підлоги}}$  – відповідні прощі поверхонь;  $\rho_{\text{стелі}}$ ,  $\rho_{\text{стіни}}$ ,  $\rho_{\text{підлоги}}$  – відповідні коефіцієнти відбиття, що враховуються для конкретних умов

Бокові стіни мають площу  $2 \cdot 5 \cdot 3 = 22,36 \text{ м}^2$ , протилежна від вікон стіна –  $6 \cdot 3,44 = 20,64 \text{ м}^2$ , тоді загальна площа стін  $S_{\text{стін}} = 43 \text{ м}^2$ ;  $S_{\text{стелі}} = S_{\text{підл}} = 30 \text{ м}^2$

$\rho_{\text{стелі}} = 0,7$ ;  $\rho_{\text{стін}} = 0,55$ , для підлоги  $\rho_{\text{підл}} = 0,3$ .

$$\rho_{\text{сер}} = \frac{53,65}{103} = 0,52$$

Получивши всі вище вираховані значення отримуємо, що  $r_1 = 2,2$ .

Розраховуємо необхідну площу вікон для забезпечення бокового природного освітлення приміщення. Визначаємо спочатку необхідні для розрахунку значення.

1. Нормоване значення (КПО)<sub>N</sub> = 1.275%.
2. Для нормальних умов середовища приймаємо, що коефіцієнт запасу  $K_3 = 1,2$ .
3. Світлова характеристика вікон  $\eta_B = 15$  та значення коефіцієнта  $r_1 = 2,2$

4. Коефіцієнт  $K_{БУД}=1,0$  %. Необхідна розрахункова площа вікон визначається за такою формулою:

$$S_{\text{вікн}} = \frac{(КПО)_N * K_3 * \eta_B * K_B * S_{\text{підл}}}{r_1 * 100 * \tau_{\text{заг}}} = 7,9 \approx 8 \text{ м}^2$$

Оскільки розрахункова площа вікон перевищує фактичну площу для даного приміщення ( $3,6 \text{ м}^2$ ) більше ніж на 10%, то можна зробити висновок, що для запропонованих умов потрібне значення КПО = 1,5 % не може бути забезпечене, природне освітлення для заданого розряду зорової роботи є недостатнім.

З урахуванням реальних умов та характеристик приміщення можна обрахувати фактичний коефіцієнт природного освітлення та встановити, якої точності зорову роботу допустимо виконувати в цьому приміщенні. Визначимо фактичний коефіцієнт природного освітлення  $(КПО)_\phi$ :

$$КПО_\phi = \frac{S_{\text{вікн}} * r_1 * 100 * \tau_{\text{заг}}}{K_3 * \eta_B * K_B * S_{\text{підл}}} = 1,2\%$$

В цьому приміщенні можна виконувати зорові роботи IV розряду, тобто роботи малої точності.[34]

#### **5.4.2. Засоби захисту від лазерного випромінювання**

Під лазерною безпекою розуміється комплекс організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, що забезпечують безпечні умови праці персоналу при застосуванні лазерів. Серед них слід виділити наступні:

- розміщення лазерних установок в окремих або огорожених частинах приміщень;
- внутрішня поверхня приміщень, а також предметів не повинна мати поверхонь з коефіцієнтом відбиття більше 0,4;
- високий рівень природного освітлення (КПО 1,5%), штучне освітлення – комбіноване, із сумарною освітленістю  $E > 150$  лк;



– наявність у приміщенні припливно-всмоктувальної штучної вентиляції відповідно до СНиП 2.04.05-91;

– обмеження доступу в приміщення сторонніх осіб - встановлення попереджувальної звукової та світлової сигналізації, попереджувальних знаків про лазерну небезпеку згідно ГОСТ 12.4.026-76

Установка лазера допускається тільки в спеціально обладнаних місцях. На дверях приміщення, де розташовані лазери класу 2, 3 і 4, повинні бути розміщені попереджувальні знаки про лазери.

Лазери класу 4 повинні бути розташовані в окремих приміщеннях. Велике значення має стан приміщення всередині. Усі предмети, крім спеціального обладнання, не повинні мати дзеркальної поверхні. Необхідно розмістити техніку так, щоб вона стояла вільно. Для лазерів 2, 3, 4 класів на лицьовій стороні пультів і пультів управління необхідно залишати вільний простір шириною 1,5 м - при однорядному розташуванні лазерів і шириною не менше 2 м - при дворядному розташуванні ззаду і збоку від лазерів відстань не менше 1 м.

Лазери класу 4 повинні керуватися дистанційно, а двері в приміщення, де вони розташовані, повинні бути замкнені.

При використанні лазерів класу 2 і 3 необхідно запобігти потраплянню випромінювання збоку на майданчик. Необхідно передбачити огороження шкідливої зони або екранування пучка випромінювання. Для екранів і огорож необхідно підбирати вогнестійкі матеріали, які мають найменший коефіцієнт відбиття на довжині хвилі генерації лазера. Ці матеріали не повинні виділяти токсичні речовини при дії лазерного випромінювання.

Заборонено працювати з лазерами класу III, IV одній особі. Якщо засоби колективного захисту не відповідають вимогам безпеки, то необхідно використовувати засоби індивідуального захисту, а саме: халати, рукавиці, щитки, маски, окуляри.

Технологічні сукні виготовляються з бавовняно-паперової тканини або бязі світло-зеленого або блакитного кольору.

### **5.5. Загальні положення про безпеку при роботі з лазерними пристроями**

Заходи безпеки, що передбачені при роботі з координатно-вимірною машиною лазерного типу:

1. На дверях приміщення повинен бути напис «Не входити» і знак лазерної небезпеки з написом «Обережно, випромінювання лазера» відповідно до ГОСТ 12.4.026-76 «сигнальні кольори і знаки безпеки».

2. У приміщенні, де розташована установка, забороняється використовувати прилади і предмети з дзеркальними поверхнями. Робочий інструментарій повинен мати матову поверхню.

3. Персонал, що працює з лазерними установками, зобов'язаний користуватися необхідними засобами індивідуального захисту і у відповідність до вимог, обумовленими класом лазерної небезпеки. Очі співробітників повинні бути захищені масками або окулярами.

4. Відповідно до вимог директиви ЕС 90/270 ЕЕС виконані основні вимоги до моніторів, які жорстко регламентують безпечні умови роботи і захист здоров'я осіб, що працюють з комп'ютерами:

- символи на екрані чіткі і добре розрізняються;
- зображення позбавлене блимання;
- яскравість або контрастність легко регулюються;
- екрани вільні від відблисків і відбиття;

Персонал, який займається ремонтом і монтажем установки, повинен мати кваліфікаційну групу з техніки безпеки не нижче IV групи з електробезпеки.

5. За всі порушення в роботі лазера, невідповідність засобів про пред'явлені їм вимоги індивідуального захисту та інші відхилення від нормального режиму роботи персонал зобов'язаний негайно доповісти адміністрації та занести в журнал оперативні записи щодо роботи та ремонту лазерної установки.

З метою запобігання нещасним випадкам забороняється:

- При роботі з лазерним випромінюванням:
  - дивитися назустріч первинному і дзеркально відбитому променю; - Залишати безконтрольним простір, в якому відбуваються маніпуляції;
  - працювати без захисних окулярів в зоні випромінювання;
  - проводити ремонтні та налагоджувальні роботи за підключеної установки до мережі;
- При експлуатації установки:
  - виконувати заміну мережевих запобіжників, з'єднання і роз'єднання кабелів при включеній в мережу установці;
  - спостерігати пряме або дзеркальне відображення лазерного випромінювання;
  - працювати на свідомо несправній установці;
  - залишати установку без нагляду у включеному стані;
  - застосовувати саморобні і нестандартні запобіжники;
  - роз'єднувати високовольтний роз'єм раніше, ніж через 2 хвилини після відключення джерела живлення лазера від мережі;
  - користуватися саморобними пристосуваннями в якості затискних пристроїв для фіксації деталей;

### **5.6. Вимоги до безпеки в аварійних ситуаціях**

Знеструмити обладнання, припинити роботу, увійти в розпорядження старшого зміни та докласти про подію. Основними причинами виникнення пожежі при нагріванні обладнання є:

- короткі замикання елементів схеми;
- встановлення запобіжників, що не відповідають номіналу;
- неправильний вибір проводів на схемі підключення;

Щоб запобігти виникненню пожежі, рекомендується вжити заходів для кожного з перерахованих вище пунктів:

- періодично перевіряти надійність роз'єму, особливо в місцях підключення кабелю до вилки. Точки підключення до зовнішніх пристроїв надійні з точки зору міцності та пайки;
- зробити перевірку правильності вибору сполучних проводів;
- не встановлюйте запобіжники, що не відповідають номіналу;

У разі пожежі використовувати вуглекислий газ вогнегасник типу ВВК-2 або водопінний аерозоль типу ВВПА-400.[35]

## **РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» визначає поняття екологічної безпеки й міри її забезпечення, екологічні вимоги до розміщення, проектуванню, будівлі, реконструкції, введенню в дію підприємств й

інших об'єктів, про застосування мінеральних добрив, засобів захисту рослин, токсичних хімічних речовин; передбачає міри охорони навколишнього природного середовища від шкідливого біологічного впливу, впливу фізичних факторів і радіоактивного забруднення.

Все різноманіття екологічних факторів за походженням і характером дії поділяють на дві великі групи - абіотичні та біотичні. До абіотичних належать неорганічні чинники, або об'єкти неживої природи, до біотичних – вплив живої природи, а також людини. Антропогенні фактори - це такі фактори, агентом яких є людина (безпосередньо або в результаті її діяльності). Роль антропогенних факторів час від часу зростає. Вирішувати екологічні проблеми важко, як і переоцінювати роль екологічної освіти та навчання, і навіть підготовки екологічного персоналу. І тому, практичне використання екологічних знань для вирішення багатьох сучасних проблем, які ставить перед собою сучасний рівень розвитку науки, вимагає більш глибоких і спеціальних знань.

Охорона кошовних і продуктивних земель (земель природоохоронного, реакційного призначення, курортів) досягається прийняттям особливого порядку їхнього відбору для державних і цивільних потреб. Відбір особливо кошовних продуктивних земель, землі науково-експериментальних об'єктів, заповідників, національних, дендрологічних, меморіальних парків, поховань й археологічних місць не допускається. При розміщенні, проектуванні й введенні в дію нових і реконструйованих об'єктів і споруджень необхідно передбачити вимоги екологічних і санітарних заходів щодо охорони землі.

При порушенні вимог земельного законодавства вводиться в дію адміністративна, кримінальна або матеріальна відповідальність.[36]

				НАУ. 22. 01 .55 000 ПЗ			
				<b>6.1. Рациональне природокористування</b>			
<b>Змн.</b>	<b>Арк.</b>	<b>№ докум.</b>	<b>Підпис</b>	<b>Дата</b>	<b>Літ.</b>	<b>Аркуш</b>	<b>Аркушіє</b>
Розроб.		Савранський В.А.					
Перевір.		Дивнич М.П.					
Реценз.							
Н. Контр.		Дивнич М.П.					
Затверд.		Мельник Ю.В.					
<b>ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА</b>					ФАЕТ- 214 гр.		

Останнім часом у зв'язку з інтенсивним використанням потенціалу природних ресурсів України, антропогенним забрудненням навколишнього природного середовища, що загрожує існуванню людини як біологічної істоти, постає нагальна потреба формування національних, регіональних та локальних міжгалузевих еколого-економічних комплексів (ЕЕК). Тобто, це сукупність видів діяльності, спрямованих на раціональне природокористування, охорону природи і створення оптимальних умов для нормального життя людини.

Основною причиною екологічної кризи є нераціональна господарська діяльність людини, яка ще мало піклується про вдосконалення технологій і створення систем спеціального обладнання, що забезпечить задовільний стан навколишнього середовища. У деяких найбільш розвинених країнах, де існують чіткі закони про охорону довкілля, довкілля має вплив громадських організацій і партій, і є достатні економічні та фінансові можливості, екологічна інфраструктура набула високого рівня розвитку. На цьому рівні еколого-економічний комплекс, крім непрямих економічних ефектів за рахунок поліпшення навколишнього середовища і здоров'я населення, збагачення потенціалу природних ресурсів, зменшення споживання сировини та енергії.

## **6.2. Заходи захисту від шкідливої дії лазерного випромінювання**

Засоби захисту від лазерного випромінювання поділяють на колективні та індивідуальні. Засоби захисту мають знижувати рівень лазерного випромінювання, яке діє на людину, до величин нижче гранично допустимого рівня. Задля безпеки при роботі з відкритими лазерними виробами застосовують засоби індивідуального захисту. До засобів індивідуального захисту від лазерного випромінювання належать засоби захисту очей, обличчя, рук, спеціальний одяг.

При роботі з лазерами II-IV класу персонал повинен використовувати закриті захисні окуляри (щитки) зі світлофільтрами в залежності від довжини хвилі лазерного випромінювання для захисту очей і маски зі спектрально-селективною прозорістю для захисту обличчя. Щоб захистити руки від впливу лазерного випромінювання, необхідно одягати бавовняні рукавички. Усі лазерні

захисні окуляри повинні мати етикетку з достатньою інформацією, щоб керувати вибором правильних окулярів для конкретного лазера. Надається відповідний одяг для захисту персоналу від радіаційного опромінення, що перевищує стандарти для шкіри.[37]

Виробничі приміщення, в яких працюють лазери, повинні відповідати вимогам діючих санітарних норм і правил. Лазерні установки розташовують так, щоб рівні випромінювання на робочих місцях були мінімальними.

### **6.3. Вплив лазерного випромінювання на навколишнє середовище та живі організми**

Основними технічними характеристиками лазерів є: довжина хвилі (мкм); ширина лінії випромінювання, інтенсивність випромінювання лазерів визначається за величиною енергії ( $W$ ) або потужності  $P$ , Дж або Вт; тривалість імпульсу ( $c$ ), та частота імпульсів ( $F$ ), Гц.

Лазерне випромінювання впливає на живий організм шляхом термічної, механічної та електричної дії. Опромінення лазерними променями може викликати функціональні порушення діяльності центральної нервової системи, серцево-судинної системи та ендокринних залоз, і може спричинити згортання або руйнування крові, пошкодити очі, шкіру, викликати генетичні зміни, головні болі, порушення сну, слабкість тощо.

Біологічна дія лазерного випромінювання виникає в результаті поглинання організмом його енергії, що викликає тепловий ефект. Теплова дія лазерного випромінювання залежить від фізичних характеристик променів, спектральних характеристик відкритих ділянок шкіри, стану кровообігу та ін.

Здатність організму засвоювати енергію залежить від природи тканин. Жир тіла взагалі не поглинає енергію. Теплова потужність внутрішніх частин тіла дуже мала, що призводить до локального нагрівання і концентрації поглиненої енергії в невеликому об'ємі. Цим пояснюється ураження головного мозку, внутрішніх органів тощо. Під впливом лазерного випромінювання рідина, що оточує

біологічні структури, миттєво випаровується, що викликає різке підвищення тиску, що призводить до ударної хвилі та механічного пошкодження. Відбувається не тільки печіння, але і розрив тканин, що становить велику небезпеку для зорового аналітика.

Найбільшу частину лазерного випромінювання сприймає шкіряний покрив, що являє собою природний екран для захисту внутрішніх органів. Унаслідок опромінення виникають опіки і набряки шкіри різних ступенів - від почервоніння до некрозу (омертвіння шкіри).

Розрізняють 4 ступені ураження шкіри лазерним випромінюванням:

I ступінь - опіки епідермісу;

II ступінь - опіки дерми (пухирі поверхневих шарів дерми);

III ступінь — опіки дерми до глибоких шарів;

IV ступінь - деструкція всієї товщини шкіри, підшкірної клітковини і прилягаючих шарів.

Особливо небезпечною є дія лазерного випромінювання на очі, через які воно проходить без втрат, досягаючи сітківки. Біологічний ефект дії лазерного випромінювання посилюється внаслідок його багаторазового впливу, а також через комбінацію з іншими чинниками виробничого середовища.[38]

### **6.3.1. Заходи захисту від шкідливої дії лазерного випромінювання**

Санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні методи включають[39]:

- контроль за рівнем шкідливості та небезпечних факторів на виробництві;
- контроль за проходженням особовим складом попередніх і періодичних медичних оглядів.

Виробничі приміщення, в яких експлуатуються лазери, повинні відповідати вимогам діючих санітарних норм і правил.



Лазерні установки розміщують таким чином, щоб рівні випромінювання на робочих місцях були мінімальними.

До організаційно-технічних методів відносяться:

- використання мінімального рівня випромінювання для досягнення поставленої мети;
- організація робочого місця;
- застосування засобів захисту;
- обмеження часу впливу випромінювання;
- організація нагляду за режимом робіт;
- вибір, планування і внутрішнє оздоблення приміщень;
- раціональне розміщення лазерних технологічних установок

## **ВИСНОВОК**

В даній кваліфікаційній роботі була розроблена функціональна схема реєстрації надмалих об'ємних деформацій, при використанні у оптичному приладі кубу зі скла, де розташований пухірець повітря, він буде виконувати функцію

мікрочастинки, і відповідно реєструвати зміну температури, чи напруженості, та застосовуватися для реєстрації зміни напруженості гірських порід з метою запобігання їх раптового викиду.

У першому розділі було розглянуто загальні відомості, та класифікацію про види деформації, методи вимірювання, де найбільш точні дані про деформацію можна отримати за допомогою електричних тензометрів.

У другому розділі були розглянуті принцип дії лазерних вимірювальних приладів, та застосування лазерного інтерферометра під час відкриття гравітаційних хвиль, де відкриття подвійної пульсарної системи PSR B1913p16, і дало змогу показати існування гравітаційних хвиль.

У третьому розділі була розроблена математична модель, за теорією Мі, де необхідно було визначити параметри двох розсіяних хвиль (інтенсивність і стан поляризації) для кожного напрямку їх прийому, де важливою частиною було, щоб у зоні вимірювання знаходилась сферична мікрочастинка, що буде опромінюватися 2 променями.

У четвертому розділі було досліджено випадок, коли прийом розсіяного випромінювання здійснюється під невеликим кутом діафрагми, і в якості прикладу приймальної діафрагми взято форму кільця. І також були розглянуті особливості, щодо глибини модуляції доплерівського сигналу при прийомі розсіяного випромінювання (співвідношення сигнал/шум).

У п'ятому розділі було наведено класифікацію небезпечних та шкідливих виробничих факторів, показано визначення гранично допустимого рівня опромінення очей та шкіри людини, засоби захисту і правила безпеки під час роботи з лазерним випромінюванням, де особливо важливо знати вимоги щодо безпеки під час аварійних ситуацій.

У шостому розділі був проведений аналіз заходів захисту від шкідливої дії лазерного випромінювання, а також досліджено вплив лазерного випромінювання на навколишнє середовище, та заходи захисту від шкідливої дії

випромінювання, де виробничі приміщення, повинні відповідати вимогам діючих санітарних норм і правил.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Деформація. URL: <https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Деформація.html>
2. Види деформації. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Деформація>
3. Деформація зсуву. URL: <https://stankiexpert.ru/tehnologii/deformaciya-sdviga.html>
4. Потенційна енергія деформації. URL: [https://scask.ru/q\\_book\\_sopr.php?id=30](https://scask.ru/q_book_sopr.php?id=30)

5. Деформація кручення. URL: <https://stankiexpert.ru/tehnologii/deformaciya-krucheniya.html>
6. Деформація розтягування-стиснення. URL: <https://sterbrust.tech/tehnologii/deformaciya-rastyazheniya-szhatiya.html>
7. Модуль Юнга (пружності). URL: <https://sterbrust.tech/spravochnik/materialovedenie/modul-yunga.html>
8. Вимірювання деформацій. URL: <https://injzashita.com/izmerenie-deformacii.html>
9. Обследование и испытание сооружений. Тетиор А.Н., Померанец В.Н. 1988.- 207 ст.
10. Структурно-петрофізичний аналіз. Напруги та деформації. URL: <https://istina.msu.ru/courses/7318155/>
11. Структурно-петрофізичний аналіз. Аналіз полів напруг. URL: <https://istina.msu.ru/courses/7318155/>
12. Патент на корисну модель 99058 Україна, МПК G01B 9/01(2006.01) Лазерний доплерівський вимірювач вібрації/Яровой Л.К., Івашенко Д.О. - № а 2011 05448; опубл., 10.07.2012, Бюл. №13.
13. Лазерная дальнометрия / Л.А. Аснис, В.П. Васильев, В.Б. Волконский и др. М.: Радио и связь, 1995, 256 с.
14. Патент на корисну модель 109900 Україна, МПК G01P 3/36 (2006/1) Лазерний доплерівський лічильник аерозолей/Дивнич М.П., Дивнич В.М. - № u 2016 03672; заявл. 06.04.2016; опубл., 12.09.2016, Бюл. №17.
15. Оптические методы исследования потоков / Ю. Н. Дубнищев, В. А. Арбузов, П. П. Белоусов, П. Я. Белоусов. - Новосибирск. Сибирское университетское издательство, 2003. - 450 с.
16. Оптические приборы: Учебное пособие / Н. А. Маслов, В. М. Бойко, М. П. Голубев, А. А. Павлов, Ал. А. Павлов, Г. А. Поздняков / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2008. 163 с.
17. Патент на корисну модель 99702 Україна, МПК G01P 3/36 (2006/1) Лазерний доплерівський вимірювач швидкості та довжини/Дивнич М.П., Дивнич В.М. - № u 2014 04083; заявл. 16.04.2014; опубл., 25.06.2015 Бюл.№12
18. Thomson J. A. L., Mengt J. C. S Scanning laser Doppler velocimeter system simulation for sensing aircraft wake vortices/ J. A. L. Thomson//J. Aircraft. – 1986. - v.13 - №8. - PP.605 - 613.
19. Azarskov V., Dyvnych V. Unmanned Aerial Vehicles Velocimeter/ V.Azarskov, V. Dyvnych//2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). - October 22-24 2019. – Kyiv. – Ukraine. - PP. 186 – 189.
20. Климков Ю.М., Хорошев М.В. Лазерная техника: Учебное пособие – М.: МИИГАиК, 2014. – 143 с.: ил

21. Когерентність. URL: <https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Когерентність.html>
22. The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.03838>
23. A new configuration for interferometric gravitational wave detectors. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037596019390620F?via%3Dihub>
24. Accurate calibration of test mass displacement in the LIGO interferometers. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/27/8/084024>
25. Search for gravitational waves from binary black hole inspiral, merger, and ringdown in LIGO-Virgo. URL: <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.87.022002>
26. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения полидисперсными частицами/Д. Дейрменджан. – Москва: Мир, 1971. – 166 с.
27. Дивнич В.М. Підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра узгодженням розсіяних хвиль за інтенсивністю/ В.М. Дивнич // Вісник НТТУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017. – Вип. 54(2). – С. 40 – 44.
28. Дивнич В.М Зменшення впливу неузгодженості розсіяного випромінювання за станом поляризації на сигнал лазерного доплерівського анемометра/В.М. Дивнич//ХУІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». - НТУУ «КПІ», Київ, 2018. - С. 39-40.
29. Землянський В.М., Дивнич Н.П. Экспериментальное исследование влияния фазы рассеянного излучения на доплеровский сигнал ЛДИС/В.М. Землянський, Н.П. Дивнич//Лазерные средства измерений и их перспективы применения в гражданской авиации. – Киев: КИИГА, 1985. – С. 84 – 90.
30. W. Merzkirch, D. Rockwell, C. Tropea Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics/W. Merzkirch - Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2010.- 274 p.
31. Дивнич М.П., Дивнич В.М. Експериментальне дослідження лазерного доплерівського вимірювача швидкості/Вісник інженерної академії наук України - 2020. - №1. – С.55-59.
32. Раздорожный А. А. Охрана труда и производственная безопасность: Учебно-методическое пособие — Москва: Изд-во «Экзамен», 2005. — 512 с. (Серия «Документы и комментарии»)
33. Лазерне випромінювання. URL: <https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/970.html>
34. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з дисципліни “Охорона праці в галузі” (для магістрів спеціальності 205-Лісове господарство) /Уклад. Смужаниця Я.В.- Ужгород: УжНУ, 2021. –56 с.
35. Обеспечение безопасности при чрезвычайных ситуациях: Учебник / Бондаренко В.А., Евтушенко С.И., Лепихова В.А. - М.:ИЦ РИОР, НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 325 с

36. Закон України ” Про охорону навколишнього середовища” № 1264-ХІІ від 25 червня 1991 року.

37. Принципи раціонального природокористування. URL:

<https://buklib.net/books/22971/>

38. Лазерне випромінювання. URL: <https://pro-op.com.ua/article/699-yak-vberegti-pratsvnikv-vid-negativnogo-vplivu-lazernogo-vipromnyuvannya>

39. Специфіка захисту від лазерного випромінювання. URL:

[https://studopedia.com.ua/1\\_81671\\_klasifikatsiya-lazeriv-za-stupenyami-nebezpechnosti-lazernogo-viprominyuvannya-spetsifika-zahistu-vid-lazernogo-viprominyuvannya.html](https://studopedia.com.ua/1_81671_klasifikatsiya-lazeriv-za-stupenyami-nebezpechnosti-lazernogo-viprominyuvannya-spetsifika-zahistu-vid-lazernogo-viprominyuvannya.html)