

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ С.В. Павлова  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

## ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Діагностування авіаційної техніки за допомогою лазерного доплерівського  
вимірювача швидкості»

Виконавець: \_\_\_\_\_ Середюк Олексій Олександрович \_\_\_\_\_  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: \_\_\_\_\_ проф., Землянський Володимир Михайлович \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ В.В.Левківський  
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2022

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Павлова С.В.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи**

Середюка Олексія Олександровича

1. Тема дипломної роботи: «Діагностування авіаційної техніки за допомогою лазерного доплерівського вимірювача швидкості» затверджена наказом ректора від: «06» грудня 2021 р. № 2658 /ст
2. Термін виконання роботи : з \_\_\_\_\_ 202 по \_\_\_\_\_ 202
3. Вихідні дані до роботи: основні дані про методи доплерівської діагностики, роботу лазерної доплерівської анемометрії, дані про принцип роботи ЛДА, потенційні можливості, методи поляризаційно-фазової корекції.

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Принцип дії лазерної доплерівської анемометрії (ЛДА); Розділ 2. Багатокомпонентні схеми ЛДА для виміру ортогональних проекцій вектора швидкості; Розділ 3. Параметри доплерівського сигналу в двокомпонентних ЛДА.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: диференціальна схема ЛДА, узагальнена структурна схема ЛДА, проекції вектора швидкості  $V_x$  і  $V_y$ , схема ЛДА з ефективною поляризацією, схема ЛДА з поляризаційною селекцією, геометрія зондуючих пучків, мала кутова апертура обмеженою діафрагмою з круглим отвором .

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підбір літератури		
2	Підготовка та написання 1 розділу		
3	Підготовка та написання 2 розділу		
4	Підготовка та написання 3 розділу		
5	Перевірка на антиплагіат та отримання рецензії на диплом		
6	Підготовка презентації та доповіді		

7. Дата видачі завдання: “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202 р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_

(підпис керівника)

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис випускника)

(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: «Діагностування авіаційної техніки за допомогою лазерного доплерівського вимірювача швидкості» складає : 67 сторінок, містить 14 рисунків і 17 використаних джерел.

Об'єкт дослідження: процес функціонування та використання лазерної доплерівської анемометрії в авіаційному діагностуванні.

Предмет дослідження: принцип дії лазерної доплерівської анемометрії, багатокomпонентних схем ЛДА для виміру ортогональних проекцій вектора швидкості, параметри доплерівського сигналу в двокомпонентних ЛДА.

Мета роботи: дослідити засоби лазерної технічної діагностики на прикладі ЛДА, принцип роботи анемометра, дослідження схем та підходів використання ЛДА для вимірювання швидкості потоків, вивчення потенційних досліджень основних похибок вимірів швидкості за допомогою ЛДА.

Методи дослідження: проведення досліджень та розрахунків, спрямованих на роботу та розуміння методів лазерної анемометрії.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження: подальше вдосконалення та використання оптичних методів, в тому числі доплерівської лазерної анемометрії для дослідження швидкості та процесів у газах у авіаційній сфері при випробуваннях авіаційних двигунів та інших систем та елементів конструкції повітряних суден.

Ключові слова: ЛАЗЕР, ЛАЗЕРНА АНЕМОМЕТРІЯ, МЕТОД, ШВИДКІСТЬ, ОПТИЧНА СХЕМА, ПОТІК, ДОПЛЕРІВСЬКІ ЧАСТОТИ, СИГНАЛ, ВИПРОМІНЮВАННЯ, ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ, АНАЛІЗ.

# ЗМІСТ

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

## ВСТУП

## РОЗДІЛ 1. Принцип дії лазерної доплерівської анемометрії (ЛДА)

- 1.1. Принцип дії ЛДА
- 1.2. Потенційні можливості ЛДА
- 1.3. Методи поляризаційно-фазового узгодження змішаних хвиль ЛДА

## РОЗДІЛ 2. Багатокомпонентні схеми ЛДА для виміру ортогональних проекцій вектора швидкості

2.1. Двокомпонентна схема ЛДА з поляризаційною селекцією сигналів для вимірювання проекцій швидкості  $V_x$  і  $V_y$  при прийомі розсіяного вперед і назад випромінювання.

2.2. Двокомпонентна схема ЛДА з поляризаційною селекцією сигналів для виміру проекцій швидкості  $V_x$  і  $V_y$  при прийомі розсіяного вперед випромінювання

## РОЗДІЛ 3. Параметри доплерівського сигналу в двокомпонентних ЛДА

- 3.1. Симетричний прийом випромінювання відносно  $OXZ$
- 3.2. Симетричний прийом випромінювання відносно  $OYZ$
- 3.3. Безконтактні виміри в авіаційній галузі

## ВИСНОВКИ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

ЛДА – лазерна доплерівська анемометрія

СКВ – середнє квадратичне відхилення

ЛА – літальний апарат

АТ – авіаційна техніка

ЛДВ – лазерна доплерівська віброметрія

## ВСТУП

Кожна одиниця авіаційної техніки безумовно повинна підлягати точному діагностуванню для забезпечення довгої та надійної роботи.

Технічним діагностуванням називається процес визначення технічного стану об'єкта з певною точністю. Метою технічної діагностики є ефективна організація процесів діагностування авіаційної техніки при виготовленні, експлуатації, ремонті та зберіганні, а також підвищення її надійності та ресурсу при якісному технічному обслуговуванні, безпечній та надійній експлуатації.

При діагностуванні визначається стан об'єкта в даний час, на майбутній і минулий періоди роботи.

Планер, двигун, функціональні системи АТ схильні до безперервних, якісних змін. Напрямок цих змін визначається другим законом термодинаміки, який стверджує, що впорядковані системи (до них відносяться всі технічні пристрої) мають тенденцію самовільно руйнуватися згодом, тобто. втратити впорядкованість, закладену у яких під час створення. Ця тенденція проявляється при спільній дії численних дезорганізаційних факторів, які не можуть бути враховані при проектуванні та виготовленні авіаційної техніки, тому процеси зміни якості здаються нерегулярними, випадковими, а їх наслідки – несподіваними.

В наш час конкурентного застосування набуває лазерна доплерівська анемометрія, як вид оптичних безконтактних методів.

Оптичні безконтактні методи дозволяють вирішити проблеми виробництва, пов'язані з недостатньою точністю, великою кількістю браку, знос вимірювального обладнання. При використанні даного методу вимірювання не виникають додаткові похибки, пов'язані, наприклад, з прослизанням.

Прилади можуть працювати у складних промислових умовах, де інші методи виявляються непридатними. Додаткові світлофільтри дозволяють знімати вимірювання з розпечених поверхонь (при гарячому прокаті або в плавильному цеху).

Використання детекторів високої роздільної здатності та сучасних алгоритмів обробки сигналу дозволяють досягти в ряді процесів найвищого ступеня точності.

На сьогоднішній день існує багато різноманітних схем вимірювання швидкостей потоків рідин і газу, що застосовуються при розрахунках гідро- та аеродинамічних лабораторних течій, при фізичному моделюванні технологічних процесів в енергетиці, в хімічній промисловості, для діагностики обтікання реальних та модельних об'єктів в авіа- та автомобілебудуванні тощо.

Лазерна доплерівська анемометрія (ЛДА) або лазерна доплерівська велосиметрія – точковий безконтактний оптичний метод вимірювання напрямку та швидкості зважених у потоці рідини або газу частинок (~0.5-5 мікрон (у газі) або 1-20 мікрон (у рідині)). Взагалі кажучи, для всіх, хто використовує теорію розсіювання Мі прийомів визначення швидкості, зважені в потоці частинки повинні бути досить великими для адекватного прийому розсіяного ними світла детектором (має бути хороше співвідношення сигнал-шум), але також досить малими для кращої відповідності руху частинок руху всього потоку загалом.

У найпростішому випадку схема виглядає наступним чином: два лазерні пучки колімованого, монохроматичного, когерентного світла перетинаються один з одним в області потоку рідини, що цікавить. Зазвичай пучки виходять завдяки розподілу одного пучка на два, таким чином, зберігаючи когерентність випромінювання. Лазерні промені перетинаються на місці їх перетяжок (фокальна точка лазерного пучка), де вони інтерферують і утворюють сімейство прямих інтерференційних смуг. Далі сенсор розташовується щодо потоку так, що інтерференційні смуги виходять перпендикулярними до напрямку потоку. Поки частинки проходять через ці смуги, слідуючи перебігу рідини, вони відображають світло (тільки з місць з адитивною



інтерференцією), що потрапляє на фотодетектор (зазвичай це лавинний фотодіод). Вимірюючи доплерівське зрушення частоти розсіяного світла, можна визначити швидкість руху трасерів, яка є також швидкістю руху потоку.

Таким чином, в даній роботі буде розглянуто такий діагностування авіаційної техніки на методі лазерної доплерівської анемометрії.

## РОЗДІЛ 1. Принцип дії лазерної доплерівської анемометрії (ЛДА)

Велику роль у розвитку науки і техніки завжди відігравали оптичні методи дослідження процесів у газах, рідинах, плазмі й атмосфері, в тому числі методи лазерної доплерівської анемометрії (ЛДА), що дозволяють вирішити проблему вимірювання швидкостей локальних швидкостей рідини та газу, а також частинок заданого розміру. Методи ЛДА знайшли широке застосування в аеро- та гідродинаміці, космічній та атомній техніці, метеорології, океанології та енергетиці, а також при стендових випробуваннях авіаційних двигунів та інших систем та елементів конструкції повітряних суден.

### 1.1. Принцип дії ЛДА

Принцип дії ЛДА заснований на визначенні доплерівського зсуву частоти лазерного випромінювання, розсіяного на мікрочастинках рухомих з вимірюваним потоком рідини або газу. В нинішній час запропоновано велику кількість варіантів виконання оптичних схем ЛДА. Найбільшого поширення набула диференціальна схема ЛДА (рис.1.1), в якій частинка, що рухається, опромінюється двома пучками з хвилевими векторами  $\vec{K}_1$  і  $\vec{K}_2$ , кут між якими дорівнює  $\gamma$ . У цій схемі розсіяне випромінювання може збирати у великій кутовій апертурі  $\Omega$ , оскільки різниця доплерівська частота

$$\omega_g = (\vec{K}_1 - \vec{K}_2) \cdot \vec{V} = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\gamma}{2} \cdot V \cos \varphi, \quad (1)$$

яка виділяється шляхом оптичного суміщення на фотоприйомнику 5 розсіяних хвиль з довжиною хвилі  $\lambda$ , не залежить від напрямлення прийому і пропорційна проекції

швидкості  $V_x = V \cos \varphi$ .

*Кафедра авіоніки*

НАУ 22 11 21 000 ПЗ

Виконав	Середюк О.О.			Діагностування авіаційної техніки за допомогою лазерного доплерівського вимірювача швидкості	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник	Землянський В.М.					10	67
Консульт.					<b>173 «Авіоніка»</b>		
Н-контр.	Левківський В.В.						
Зав. каф.	Павлова С.В.						

Таким чином, за допомогою ЛДА вимірюється швидкість світлорозсіювальних частинок, зважених у рідкому або газоподібному середовищі.

Якщо світлорозсіювальна частка має досить малий розмір і її щільність дорівнює щільності навколишнього її середовища, а розмір частинки істотно менше мікромасштабу турбулентності, то при певній їх концентрації слід вважати, що вимірювана швидкість подвоєння частинок практично збігається зі швидкістю досліджуваного середовища.

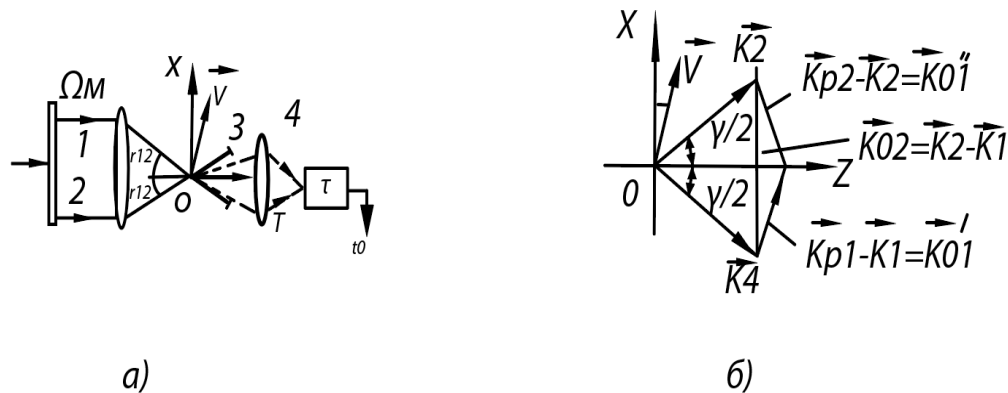


Рис.1. Диференціальна схема ЛДА

Для забезпечення високих точнісних характеристик лазерного доплерівського методу в ряді практичних ситуацій необхідно використовувати сферичні частинки заданого розміру та щільності, що дозволить звести до мінімуму методичну погрішність вимірювання.

У практиці аерогідродинамічного експерименту найчастіше заперечуються чотири основних види потоку рідини або газу в залежності від використовуваних в них оветорозсіяних частинок:

1. Технологічно чисто рідкі і газоподібні середні, проходять попередню тонку фільтрацію, що забезпечує видалення з них природних домішок.
2. Рідкі та газоподібні середовища, що містять властиві домішки полідисперсних мікрочастинок, параметри яких змінюються в широких межах. Технологічний процес використання цих шкідників дозволяє проводити їх очищення.
3. Рідкі та газоподібні середовища, наприклад, високошвидкісні повітряні потоки, що містять осьові забруднення у вигляді полідисперсних мікрочастинок, технологічний процес і використання яких не дозволяє забезпечити додаткове ефективне їх очищення від природних домішок.
4. Двофазні повітряні потоки, які містять полідисперсні рідкі частки сферичної форми.

При вимірюваннях швидкості технологічних чистих потоків або потоків другого виду, що провели попередню очистку, в них в більшості випадків доцільно вводити штучні монодисперсні сферичні частки з відомими параметрами (калібровані мікрочастини). При точних вимірах швидкості потоків третього виду можливі два підходи. Перший запропонує використання тільки тих природних мікрочастинок, розмір яких не перевищує заданого діаметру, наприклад,  $d_r \leq 0,5 \dots 2.0$  мкм. У цьому випадку структурна схема ЛДА повинна включати пристрій контролю розмірів мікрочастинок. Другий підхід реалізується в тих випадках, коли концентрація природних мікрочастинок недостатня для точного виміру швидкості потоку, тому досліджуваний потік вводять штучно калібровані мікрочастинки. Тоді структурна схема ЛДА повинна мати прилад розпізнавання каліброваних частинок, які дозволяють вимір доплерівської частоти сигналу, що формується лише від каліброваних частинок. При вимірюванні швидкості частинок двофазного потоку слід одночасно з вимірюванням швидкості частинок здійснювати контроль та класифікацію їх за розмірами.

Для введення в потік штучних світлорозсіювальних частинок використовують різні типи генераторів монодисперсних аерозолей, що забезпечують створення рідких

або твердих сферичних частинок із заданим діаметром, щільністю, показником заломлення та оптимальною концентрацією. У ЛДА розрізняють одночастковий і багаточастковий режим роботи. При точному вимірі швидкості потоків третього типу або двофазних середовищ переважно одночастковий режим роботи, так як в багаточастковому здійснити вимірювання розмірів частинок, що проходять через зону вимірювання, стає практично неможливим.

Одна з основних проблем ЛДА - вибір оптимізації параметрів як оптичної схеми ЛДА та її структури, так і світлорозсіювальних частинок (в рамках граничних значень), забезпечують досить високий рівень доплерівського сигналу і відношення сигналу/шуму (с/ш), при яких можна досягти високої точності виснаження доплерівських частот. При оптимізації оптичної схеми ЛДА використовує два теоретичні підходи: на основі методів Фур'є-оптики і не основі теорії розсіювання Мі. Не дивлячись на додатковість Фур'є-аналізу оптичних схем ЛДА цей метод має ряд обмежень, зокрема: не враховує поляризаційні та фазові ефекти, спостерігаючи при розсовуванні випромінюванні на частинці. Аналіз просторової структури доплерівського сигналу на основі теорії розсіяння Мі, дозволяють, враховуючи тонкі поляризаційні і фазові ефекти, виявити їх існуючий вплив на параметри доплерівського сигналу і розробити методи оптимізації ЛДА.

В роботі розглянута теорія розрахунку параметрів доплерівського сигналу диференціальної схеми ЛДА для одночасткового та багаточасткового режимів роботи з урахуванням поляризаційно-фазових ефектів розсіяння, що дозволяє однозначно оцінювати ступінь впливу як фазового, так і поляризаційного узгодження змішуваних хвиль на доплерівський сигнал і с/ш.

Для диференціальної схеми ЛДА встановлені два види симетричного прийому при різних поляризаціях пучків, при яких спостерігається формування фазово пов'язаних доплерівських сигналів.

Першому виду симетричного прийому відповідає схема ЛДА, коли для двох напрямків прийому, симетричних відносно площини ( $OYZ$ ), що проходить через вісь  $OZ$  і орієнтованої перпендикулярно площині пучків ( $OXZ$ ), доплерівські сигнали є фазово пов'язаними, за умови, що пучки мають такі стани поляризації: а) лінійні узгодження; б) лінійні з напрямком електричних векторів у площині пучків; в) один пучок має правоциркулярну (лівоциркулярну), а інший лівоциркулярну (правоциркулярну) поляризацію; г) лінійні поляризації з рівним по модулю, але протилежними за знаком азимуту.

Другому виду симетричного прийому відповідає схема ЛДА, в якій фазово пов'язані доплерівські сигнали формуються при прийомі випромінювання у двох напрямках, осесиметричних відносно по осі схеми ЛДА  $OZ$  (рис.1.1), якщо пучки мають або еліптичні поляризації з однаковими азимутами і еліптичністю, або правоциркулярні (лівоциркулярні) поляризації, або лінійні поляризації з рівними азимутами. Крім того, якщо в вимірному обсязі під одним і тим же кутом перетинаються одна і друга пара рівних за інтенсивністю пучків, некогерентних за відношенням один до одного та маючих лінійні взаємно ортогональні поляризації, розгорнуті по відношенню один до одного на  $90^\circ$ , то доплерівський сигнал від однієї пари пучків, що спостерігаються у векторному довільному напрямку, є фазовим сполученням за відношенням до доплерівського сигналу від іншої пари пучків, що спостерігаються за напрямком, симетричним першому відносно площині, що проходить через вісь схеми і орієнтованої перпендикулярно площині пучків. Якщо пучки мають лінійні взаємно ортогональні поляризації, то для двох напрямків прийому симетричних відносно площині пучків доплерівські сигнали незалежно від інтенсивностей пучків рівні по амплітуді і знаходяться в протифазі.

Для зазначених двох видів симетричного прийому розсіяного випромінювання ЛДА вперше дослідження залежності фази доплерівського сигналу, визначеної ефектами розсіяння, від напрямку прийому, кута між зондуючими пучками, кутової

прийомної апертури, розміру часток і дана їх фізична інтерпретація. Існують дві просторово сполучені області симетричного прийому, доплерівські сигнали від яких знаходяться в протифазі, тому при певних параметрах схеми та розсіюючих частинок спостерігається ефект повної взаємокомпенсації цих сигналів і сумарний доплерівський сигнал рівень нулю. В загальному випадку залежно від співвідношення цих двох складових сигналів фаза доплерівського сигналу може приймати тільки два можливі значення:  $\Phi_g = 0$  або  $\Phi_g = 180$ .

## 1.2. Потенційні можливості ЛДА

Оцінка основної похибки вимірів швидкості за допомогою ЛДА повинна включати визначення як методичних та інструментальних похибок, так і похибки калібрування ЛДА, що виникає вслід неточного визначення коефіцієнта лінійного зв'язку «доплерівська частота - вимірювана швидкість». Надалі похибка результату виміру швидкості за допомогою ЛДА будемо розглядати як випадкову величину  $\Delta_V$ , що складається з систематичної і випадкової похибок. При цьому випадкова хибка (якщо спеціально на обумовлено) передбачається централізованою опромінюваною величиною з нормальними розподілом. Попередньо, виявляється, більшість практично зустрічаються математичних функцій можуть бути з будь-якою точністю представлені на околицях деякої точки у вигляді статичних рядів, що містять ступені змінної в порядку зростання. Наприклад, на околиці точки  $x=1$ :

$$e^x = e + e(x - 1) + \frac{(x - 1)^2}{2!} e + \frac{(x - 1)^3}{3!} e + \dots$$

$$\sin x = 1 - \frac{(x - 1)^2}{2!} + \frac{(x - 1)^4}{4!} - \frac{(x - 1)^6}{6!} + \dots$$

При використанні рядів, званих рядами Тейлора, змішані функції, що містять, скажімо, алгебраїчні, тригонометричні та експоненціальні функції, можуть бути виражені як чисто алгебраїчні функції. За допомогою рядів часто можна швидко здійснити диференціювання та інтегрування.

Тоді, розклавши рівняння (1) до ряду Тейлора, абсолютну похибку і вимірювання швидкості враховуючи методичну похибку можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} \Delta_V = & \Delta_{MV} + \frac{\lambda}{2 \sin^{\gamma/2}} \Delta_f + \frac{fg}{2 \sin^{\gamma/2}} \cdot \Delta_\lambda - \frac{\lambda fg ctg^{\gamma/2}}{4 \sin^{\gamma/2}} + \\ & + \frac{1}{2 \sin^{\gamma/2}} \Delta_f \Delta_\lambda - \frac{fg ctg^{\gamma/2}}{4 \sin^{\gamma/2}} \Delta_\lambda \Delta_\gamma - \frac{\lambda ctg^{\gamma/2}}{4 \sin^{\gamma/2}} \Delta_f \Delta_\lambda + \\ & + \frac{fg\lambda}{g} \left( \frac{1}{2 \sin^{\gamma/2}} + \frac{ctg^{2\gamma/2}}{\sin^{\gamma/2}} \right) \Delta_\gamma^2, \quad (2) \end{aligned}$$

де  $\Delta_{MV}$  – сумарна методична похибка зміна швидкості.

Обчисливши математичне очікування  $\Delta_V$  і враховуючи, що для некорельованих похибок  $M[\Delta_\lambda \Delta_\gamma] = 0$ , можливо визначити граничне значення основної систематичної похибки, яке для її відносного значення з урахуванням всіх складових похибок прийме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_V}{V} = & \left( \frac{\Delta_{c1}}{V} + \frac{\Delta_{c2}}{V} + \frac{\Delta_{c/1}}{fg} + \frac{\Delta_{cf2}}{fg} \right) M + \\ & + \frac{\Delta_{c\Omega}}{fg} + \frac{\Delta_{cf'3}}{fg} + \frac{\Delta_{cf''3}}{fg} + \frac{\Delta_{c\lambda}}{\lambda} + \frac{ctg^{\gamma/2}}{2} \Delta_{c\gamma} + \\ & + \frac{rf\lambda\sigma\lambda}{fg\lambda} \sqrt{D_{f3} + D_{f''3}} - \frac{ctg^{\gamma/2}}{2/g} r_{f\gamma\sigma} \sqrt{D_{f3} + D_{f''3}} + \end{aligned}$$



$$+ \frac{D_{\gamma}}{8} + \frac{ctg^{2\gamma}/2D_{\gamma}}{4}, (3)$$

Де похибка з індексом «с» - систематичні похибки;  $\sigma_{M1} = \frac{\Delta c1}{v}$  - відносна методична похибка вимірювання швидкості, обусловлена відмінністю швидкості руху частки від швидкості потоку;  $\sigma_{M2} = \frac{\Delta c2}{v}$  - методична похибка вимірювання швидкості, яка виникає внаслідок світового тиску лазерного пучка на частку;  $\sigma_{M3} = \frac{\Delta cf1}{fg}$  - методична похибка, пов'язана з прийнятою наближеною залежністю «доплерівська частота – швидкість»;  $\sigma_{M4} = \frac{\Delta f2}{fg}$  – методична похибка, яка виникла внаслідок зміни фази розсіяного випромінювання від напрямку спостереження розсіяного випромінювання  $\sigma_5 = \frac{\Delta c\Omega}{fg}$  – інструментальна похибка через нестабільність частотного зрушення зондуєчого пучка;  $\sigma_6 = \frac{\Delta cf3}{fg}$  – інструментальна похибка, обумовлена кривизною хвильового фронту зондуєчих пучків в зоні виміру;  $\sigma_7 = \frac{\Delta cf'3}{fg}$  – похибка виміру доплерівської частоти;  $\sigma_8 = \frac{\Delta c\lambda}{\lambda}$  – похибка визначення довжини хвилі випромінювання;  $\Delta_{c\gamma}$  – абсолютна похибка виміру кута між зондуєчими пучками;  $r_{f\lambda}$  – коефіцієнт кореляції між випадковими похибками  $\Delta_{f3}$  і  $\Delta_{\lambda}$ ;  $\sigma_{\lambda}$  – середнє квадратичне відхилення (СКВ) випадковою похибкою  $\Delta_{\lambda}$ ;

$D_{f3} = D_{\Omega} + D_{f2} + D_{f'3}$ ;  $D_{\Omega}$ ,  $D_{f2}$ ,  $D_{f'3}$  – дисперсії некорельованих випадкових похибок  $\Delta_{\Omega}$ ,  $\Delta_{f2}$  і  $\Delta_{f'3}$ ;  $D_{f''3}$  – дисперсія випадкових похибок  $\Delta_{f''3}$ ;  $r_{f\gamma}$  – коефіцієнт кореляції між випадковими похибками  $\Delta_{f3}$  і  $\Delta_{\gamma}$ ;  $\sigma_{\gamma}$  – СКВ випадкової похибки  $\Delta_{\gamma}$ ;  $D_{\gamma}$  – дисперсія випадкової похибки  $\Delta_{\gamma}$ .

Систематичні похибки являються детермінованими величинами, тому кожна складова систематичної похибки може бути обчислена або визначена експериментально і виключена з результату виміру шляхом введення відповідних поправок.

Якщо всі складові систематичної похибки будуть включені шляхом введення поправок, то, як слідує з (3), результат вимірів будуть мати систематичну похибку.

$$\frac{\Delta_{cv}}{V} = \frac{1}{fg\lambda} rf\lambda\sigma\lambda\sqrt{D_{f3} + D_{f''3}} - \frac{ctg^{\gamma}/2}{2fg} rf\gamma\sigma\gamma\sqrt{D_{f3} + D_{f''3}} + \frac{D_{\gamma}}{8} + \frac{ctg^{2\gamma}/2}{4} D_{\gamma}. \quad (4)$$

Ця систематична похибка має мінімальне значення

$$\left(\frac{\Delta_{cv}}{V}\right)_{min} = \frac{1}{fg\lambda} rf\lambda\sigma\lambda\sqrt{D_{f3} + D_{f''3}} + \frac{D_{\gamma}}{8} \quad (5)$$

для схеми ЛДА на зустрічних пучках, а її максимальне значення спостерігається в схемі ЛДА з малими кутами між пучками ( $\gamma < 4^\circ$ )

$$\left(\frac{\Delta_{cv}}{V}\right)_{max} = \frac{ctg^{2\gamma}/2}{4} D_{\gamma} - \frac{ctg^{\gamma}/2}{2fg} rf\gamma\sigma\gamma\sqrt{D_{f3} + D_{f''3}}. \quad (6)$$

Після введення деяких поправок систематична похибка включає в себе ряд, так званих, невиключних залишків систематичної похибки, якщо врахувати, що невиключені залишки систематичних похибок мають рівномірне розподілення, то використовуючи (2), можна знехтувати утворенням похибок порівняно з самими похибками і виявити дисперсію похибок вимірів швидкості, а потім і СКВ

$$\frac{\sigma_V}{V} = \left( \begin{array}{l} \frac{\theta_1^2}{3} + \frac{\theta_2^2}{3} + \frac{\theta_{f1}^2}{3} + \frac{\theta_{f2}^2}{3} + \frac{\theta_{f''3}^2}{3} + \frac{\theta_{\Omega}^2}{3} + \frac{\theta_{\gamma}^2}{3} + \\ \frac{\theta_{\lambda}^2}{3} + \frac{D_{\Omega}}{fg^2} + \frac{D_{f''3}}{fg^2} + \frac{D_{f2}}{fg^2} + \frac{D_{f'3}}{fg^2} + \frac{D_{\lambda}}{\lambda^2} + \frac{ctg^{2\gamma}/2}{4} \sigma_{\gamma}^2 + \\ + \frac{21^\circ f\lambda\sigma\lambda\sqrt{D_{f3} + D_{f''3}}}{fg\lambda} - \frac{ctg^{\gamma}/2}{fg} rf\gamma\sigma\gamma\sqrt{D_{f3} + D_{f''3}} \end{array} \right) \frac{1}{2}, \quad (7)$$

де,  $\pm\theta_i$  – межі  $i$  – го невиключеного залишку систематичної відносної похибки.

Аналіз СКВ похибок різних методів вимірювання доплерівської частоти свідчить про те, що зменшення цієї похибки до величини менше 0,1% можливе тільки при

високому відношенні с/ш, тобто при забезпеченні в ЛДА високої ступеня фазового, поляризаційного і амплітудного узгодження розсіяних хвиль, що змішуються. Зменшення цієї похибки спостерігається також зі збільшенням кута між зондуючими пучками  $\gamma$  (при цьому також зростає ефективне число інтерференційних смужок  $N$  у вимірювальному об'ємі), якщо прийняті заходи з збереження незмінного просторового дозволу і високого рівня відношення с/ш. Оцінки похибок  $\delta_{M1}, \delta_{M2}, \delta_{M3}, \delta_6, \delta_7$ , а також похибок вимірювання доплерівської частоти для конкретних розроблених систем обробки доплерівського сигналу ЛДА, більш докладно розглянемо методичну апертурну похибку  $\delta_{M4}$ . Її поява пов'язана з тим, що кінцевий розмір зони вимірювання при спостереженні розсіяного випромінювання деякому напрямку обумовлює зміну кута розсіювання  $\Delta\theta$  і відповідає зміні фази доплерівського сигналу  $\Phi_{gi}$ , при проходженні частки через дві протилежні точки зони вимірювання. Проведені дослідження залежності фази доплерівського сигналу диференціальної схеми ЛДА від кута розсіювання  $\Phi_{gi} = f(\theta_i)$  [2] свідчать про те, що крутизна цієї характеристики  $S_\phi = \frac{d\Phi_{gi}}{d\theta_i}$  може змінюватись в широких межах  $S_\phi = 1 + 180$ , а її значення виявляться параметрами як оптичної схеми ЛДА, так і частинок. Помітна зміна фази доплерівського сигналу від напрямку прийому призводить до того, що високочастотна залишкова сигналу на виході фотоприймача має частоту, відмінну від доплерівської

$$\omega = \omega_g + \Delta\omega = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\gamma}{2} V_x + \frac{\Delta\overline{\Phi_{gi}}}{\Delta t}, \quad (8)$$

де  $\Delta\overline{\Phi_{gi}}$  – середнє квадратичне значення прирощення фази доплерівського сигналу, що відповідає спостережуваній зміні кута розсіювання  $\Delta\theta$  при проходженні частки через зону виміру;  $\Delta t$  – час прольоту частки зони виміру.

Цей спостережуваний додатковий до доплерівського зсув частоти призводить до виникнення методичної апертурної похибки. Визначимо цю похибку, припускаючи, що, по-перше, частка проходить зону вимірювання в площині  $OXZ$  (рис. 1.1) в напрямку осі

$OX$ , формовану перетином гауссових пучків з ефективним радіусом  $B_0$ , по-друге, прийом розсіяного вперед або назад випромінюванням усунення здійснюється в точці  $A_i$ , розташованій на осі схеми  $OZ$  на відстані  $r$  від центру зони виміру. Тоді, враховуючи, що діапазон зони вимірювання дорівнює  $d_x = \frac{2B_c}{\cos^{\gamma/2}}$  а прирощення кута розіання становить  $\Delta\theta = \left(180^\circ - \arctg \frac{2r}{d_x}\right)$ , легко показати, що відносна методична апертурна похибки рівна

$$\delta_{M4} = \frac{\lambda S_\phi \left(90^\circ - \arctg \frac{r \cos^{\gamma/2}}{B_c}\right)}{4B_c t g^{\gamma/2} \cdot 180^\circ} \cdot (9)$$

З (9) слідує, що збільшення кута між пучками  $\gamma$  або відстані –  $r$  приводить до зменшення методичної апертурної похибки при  $S_\phi = const$ . Розглянемо ЛДА з наступними параметрами:  $\lambda = 0,6328$  мкм;  $\gamma = 4^\circ$ ;  $S_\phi = 90$ ;  $r = 30$  мм;  $B_c = 200$  мкм. Тоді похибка, згідно (9), дорівнює  $\delta_{M4} = 0,4$  %, тобто має досить помітну величину. Щоб ця похибка становила порядку ні  $\delta_{M4} = 0,01$  %, необхідно збільшити відстань  $r$  до 100 см. В (2) представлено результати розрахунку залежності фаз доплерівського сигналу від напрямку прийому  $\Phi_{gi} = f(\theta_i)$  для ЛДА з  $\gamma = 10^\circ$  при використанні часток  $d_r = 1,5$  мкм,  $m = 1,59$  та  $\lambda = 0,6328$  мкм. В цьому випадку для ЛДА з прийомом розсіяного назад випромінювання ( $\theta_c = 175^\circ$ ) крутизна  $S_\phi = 18$  і похибка вимірювання при  $r = 30$  мм і  $B_c = 200$  мкм, згідно (9), становить  $\delta_{M4} = 0,03\%$ . Апертурна похибка навіть при великих значеннях  $S_\phi$  прагне до нуля при спостереженні розсіяного випромінювання в напрямку, перпендикулярному осі схеми  $OZ$  (рис. 1.1), так як у цьому випадку спостерігається мінімальна зміна кута  $-\Delta\theta$  при проходженні частинки через зону вимірювання. Якщо з конструктивних міркувань важко реалізувати зміну параметрів ЛДА  $\gamma$  і  $r$ , то для зменшення апертурної похибки при прийомі розсіяного випромінювання вздовж осі  $OZ$  слід передбачити використання частинок з такими параметрами, при яких крутизна фазової залежності доплерівського сигналу прагне до мінімального значення  $-S_{\phi min}$ .

Приведений аналіз дозволив визначити ступінь впливу фазових ефектів розсіяння на методичну апертурну похибку, яка може складати залежно від вибраних параметрів схеми ЛДА і розсіяних часток величину  $\delta_{M4} = \pm(0,01 \div 0,4\%)$ , причому знак цієї похибки визначається знаком крутизни фазової характеристики доплерівського сигналу.

Виведемо численну оцінку похибки виміру швидкості за допомоги ЛДА, припускаючи, що вимір частоти доплерівського сигналу здійснюється за допомоги доплерівського процесора з СКВ похибки  $\frac{\sigma_{f'13}}{fg} = 0,1\%$ . Кут між пучками –  $\gamma = 4^\circ$  виміреним з похибкою  $\Delta_{cy} = 1'$ ; в вимірювальному об'ємі формується  $N=10$  інтерференційних смуг. Будемо також вважати, що оптична схема ЛДА спроектована без рахунку впливу її параметрів на кожну з складових розглянутої похибки і виникає ситуація, при якій кожна складова похибки мають межу величину. Тоді, згідно (3), межеве значення основної систематичної похибки вимірювання швидкості складає  $\frac{\Delta_{cv}}{v} = 1,54$ , і основний внесок у неї вносять похибку візуалізації  $\delta_{M4} = 0,1\%$ , апертурна похибка  $\delta_{M4} = 0,4\%$ , похибка частотного зсуву  $\delta_5 = 0,1\%$ , похибка через кривизну хвильових фронтів зондуючих пучків  $\delta_6 = 0,4\%$ , а також похибки виміру кута і доплерівської частоти  $\delta_7 = 0,1\%$ . При оцінці СКВ похибки вимірювання швидкості передбачимо, що виключені залишки систематичних похибок становлять не більше 20% від самих похибок, а випадкові складові кожної з розглянутих похибок мають нормальні розподіли і складають не більше 30% від відповідної систематичної складника похибки. Тоді СКВ похибки виміру швидкості з врахуванням досить сильного кореляційного зв'язку між похибками, згідно (7), становить  $\frac{\sigma_v}{v} = 0,15\%$  (ця похибка без урахування дисперсії поправок дорівнює  $\frac{\sigma_v}{v} = 0,13\%$ ), а якщо вважати, що взаємна кореляція між похибками і відсутня, то  $\frac{\sigma_v}{\sigma_v} = 0,2\%$ . Враховуючи, що для більшого класу розподілів довірчому інтервалу випадкової похибки  $\pm 1,6\sigma_3$  відповідає довірча ймовірність  $P = 0,9$ , для розглянутого прикладу можна визначити результуючу похибку виміру швидкості, яка складає  $\Delta'_v = \pm 1,7\%$ , якщо систематичні похибки вимірювання не усунуті з

результату виміру, і  $\Delta'_V = \pm 0,24 \%$  - при корекції результатів виміру шляхом введення поправок. Без обліку взаємно кореляційних зв'язків ці похибки відносно рівні  $\Delta'_V = \pm 1,9 \%$  і  $9\%$  і  $\Delta'_V = \pm 0,32 \%$ .

Таким чином незважаючи на відносно високу точність вимірювання доплерівської частоти, похибка вимірювання швидкості нераціонально в побудові схеми ЛДА може досягати великої величини. Схема датчика ЛДА повинна бути побудована так, щоб систематичні складові похибки були мінімальні, оскільки багатьох практичних ситуаціях використання ЛДА точне визначення кожної складової систематичної похибки дуже важко. Насамперед слід зменшити похибки візуалізації, частотного зсуву, кривизни хвильових фронтів, апертурну похибку, а також похибки вимірів кута і частоти доплерівського сигналу. Якщо забезпечити відповідність параметрів потоку з параметрами розсіювальних частинок, то ця складова похибки не перевищуватиме  $\delta_{M1} = 0,01\%$ . Апертурна похибка (9) може бути зменшена до  $\delta_{M4} = 0,01\%$  за рахунок збільшення кута між пучками  $\gamma$  і узгодження розміру частинок з параметрами оптичного приймального блоку ЛДА. При правильному виборі величини частотного зсуву може бути так обмежена до  $0,01\%$  або повністю компенсована при структурній її кореляції. Похибка через кривизну хвильових фронтів зондуючих пучків може бути зменшена до величини  $\delta_D = 0,1\% \div 0,03\%$  шляхом збільшення кута  $\gamma$ , раціонального налаштування схеми, а також обмеження зони вимірювального об'єму, з якого приймається розсіяне випромінювання. Систематичну похибку вимірювання частоти в однокомпонентному ЛДА можливо зменшити до  $0,01\%$ , якщо вектор швидкості потоку орієнтовано перпендикулярно до осі схем, визначивши ефективне число інтерференційних смуг у вимірювальному об'ємі шляхом збільшення кута між пучками. Кутова похибка виміру відкинеться до нуля при  $\gamma = 180^\circ$ , тобто її можливо зменшити, збільшуючи кут між пучками і використовуючи прецизійні методи вимірювання кута.

Таким чином, при раціональному виборі параметрів схеми ЛДА і розсіювальних частинок мінімальна оцінка систематичної похибки, що визначається згідно з виразом

(3), з урахуванням впливу на неї параметрів випадкових похибок (4) дорівнює 0,083%. Однак у деяких практичних ситуаціях ця похибка дорівнює 0,24%, оскільки похибка кривизни може бути зменшена тільки до 0,1% (так як  $\gamma \ll \gamma_{кр}$ ), а похибка виміру кута може бути порядком 0,1% .

Що стосується СКВ похибки (7), то мінімальне значення спостерігається при  $\gamma_1 = 180^\circ$  і  $\gamma_2 = 2 \arctg \left( \frac{4r\gamma \sqrt{D_{f3} + D_{f13}}}{f_g \sigma_\gamma} \right)$ , причому один з цих кутів -  $\gamma$ , відповідає схемі ЛДА на зустрічних пучках, а другий -  $\gamma_2$  – ЛДА з малим кутом між пучками. В цьому випадку СКВ похибки порядку 0,1% і визначається в основному СКВ похибки вимірювання доплерівської частоти. Виходячи з проведених оцінок, результуюча основна похибка вимірювання швидкості при раціональній побудові схемі датчика ЛДА знаходиться в межах  $\Delta'_v = \pm(0,24 \div 0,5)\%$ ;  $P = 0,9$  в залежності від величини систематичної похибки.

### 1.3. Методи поляризаційно-фазового узгодження змішаних хвиль ЛДА

При точних вимірах швидкості чотирьох типів потоків як світлорозсіювальних частинок слід використовувати калібровані сферичні частинки заданого розміру, що дозволяє знести до мінімуму. При цьому в ряді практичних ситуацій зміна швидкостей каліброваних частинок, що рухаються з потоком, має супроводжуватися розпізнаванням цих частинок від природніх забруднень потоку. Наведений у попередньому підрозділі аналіз складальних похибок вимірювання швидкості показав, що їх помітне зменшення спостерігається зі збільшенням кута між пучками  $\gamma$ .

Розглянемо узагальнену структурну схему ЛДА (рис.1.2) для одночасткового режиму його роботи. В якості джерела випромінювання в ЛДА зазвичай використовують один або кілька однохвильових або багатохвильових лазерів безперервної дії. За допомогою блоку формування зондуєчих пучків у досліджуваній потік фокусуються два або кілька пучків, відмінних довжинам хвиль, частотам, станам поляризації та потужності. Генератор аерозолів вводить у потік калібровані сферичні частинки

заданого розміру. Розсіяне випромінювання надходить в оптичний приймально-коригуючий блок, який крім об'єктивів, світлорозділювачів, дзеркал, змішувачів та інтерференційних фільтрів містить оптичний блок поляризаційно-фазового узгодження змішаних хвиль, розсіяних каліброваних частинок, що складаються з поляризаційних та просторових фільтрів або блоку симетричного прийому. Далі розсіяне випромінювання направляється на один, два або кілька фотоприймачів, що складають матрицю фотоприймачів, у разі використання багатоканального приймально-коригувального блоку. Високочастотні доплерівські сигнали з виходів фотоприймачів через блок формування синфазних сигналів, що застосовувані при багатоканальному прийомі, надходять на входи одного, двох або трьох доплерівських процесорів, які видають інформацію про проекції векторів швидкості. Блок синфазних сигналів забезпечує у разі багатоканального прийому на матричний фотоприймач, що складається з  $n$ -числа фотоприймачів, отримання  $n$ -числа синфазних доплерівських сигналів, які потім сумуються, тобто цей блок призначений для здійснення фазової корекції доплерівських сигналів, формованих на виході кожного  $i$ -го фотоприймача при прийомі випромінювання у великій кутовій апертурі. Якщо досліджуваний потік окрім каліброваних частинок містить природні мікрочастинки (або є двофазним), то структурна схема ЛДА включає пристрій розпізнавання часток, яке видає сигнал в доплерівський процесор, що дозволяє вимірювати частоти лише при проходженні через вимірювальний об'єм часток заданого розміру, виключаючи тим вимір швидкості часток, що йдуть за потоком з відносно великою похибкою. Найбільш істотний вплив поляризаційно-фазових ефектів, що спостерігаються при розсіюванні випромінювання, позначається на роботі диференціальної схеми ЛДА, приводячи в деяких випадках (особливо при відносно великих кутах  $\gamma$ ) до різкого зниження фазового і поляризаційного узгодження змішаних хвиль і в кінці кінців обумовлюючи низьку завадостійкість і точність ЛДА. У цих випадках високих метрологічних характеристик можливо досягти за рахунок застосування в ЛДА блоку поляризаційно-фазового узгодження змішуваних хвиль.



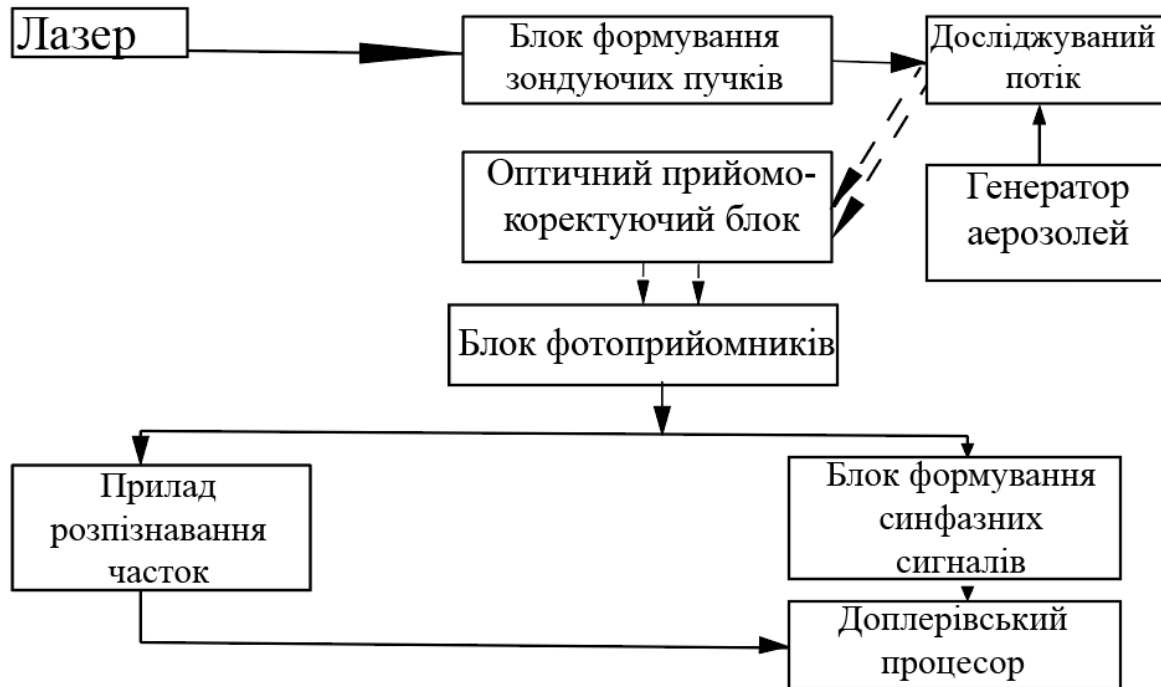


Рис. 1.2. Узагальнена структурна схема ЛДА

За допомогою цього блоку забезпечуються або тільки фазове або поляризаційне узгодження, або одночасно поляризаційно-фазове узгодження. Для цього і використовуються параметричні та структурні методи. Структурні методи, у свою чергу, поділяються на оптичні та оптоелектронні.

Параметричні методи поляризаційно-фазового узгодження засновані на оптимізації сигналу за рахунок зміни параметрів схем ЛДА або параметрів, які вводяться в потік світлорозсіювальних часток, наприклад, кута між пучками  $\gamma$  і їх стану поляризації, напрямку прийому і прийомної апертури, розміру часток і їх показника заломлення.

В основу структурних методів поляризаційно-фазового узгодження покладено використання відповідних систем корекції або тільки в оптичному приймальному

блоці (оптичні методи), або одночасно в оптичному електронному блоці ЛДА (оптоелектронні методи).

Розглянемо класифікацію структурних фазових методів узгодження змішаних хвиль у ЛДА, необхідність реалізації яких виникає у тих випадках, коли за низького значення коефіцієнта фазового узгодження  $K_\phi$ , спостерігається відносно високе поляризаційне узгодження ( $K_{\text{П}} = 1$ ), наприклад для прийому розсіяного вперед випромінювання або розсіяного назад випромінювання поруч площини пучків. Структурні оптичні методи поділяються на метод симетричного прийому фазово споряджених сигналів, метод синфазної просторової фільтрації для великих частинок і метод фазової просторової фільтрації.

Метод симетричного прийому використовується для часток, зрівняних з довжиною хвилі випромінювання. Він заснований на двох видах симетричного прийому, при яких на спостерігається формування фазово споряджених доплерівських сигналів, що дозволяє виділити для конкретної схеми ЛДА дві просторові області прийому, доплерівські сигнали від яких знаходяться в протифазі. Здійснюючи одноканальну просторову фільтрацію або двоканальну протифазну просторову фільтрацію можна зменшити фазову корекцію розсіяного випромінювання. Якщо схему ЛДА використовувати для виявлення розмірів частинок, то, застосовуючи метод чотирьоххвильового симетричного зміщення, можна досягти не тільки повного фазового, але і амплітудного узгодження змішуваних хвиль.

Метод синфазної просторової фільтрації використовується при прийомі розсіяного вперед випромінювання на великих частинках (коли виконуються умови дифракції Фраунгофера). У такому випадку в кожному напрямі прийому доплерівський сигнал має фазу  $\Phi_0 = 0^\circ$  або  $\Phi_g = 180^\circ$ , тому, користуючись або одноканальною просторовою фільтрацією, або двоканальну протифазну просторову фільтрацію, або при одноканальному прийомі метод поляризаційно-фазової корекції розсіяного

випромінювання, можливо забезпечити високий рівень фазового узгодження змішуваних хвиль.

Метод фазової просторової фільтрації заснований на прийомі випромінювання в деякій просторовій області такої конфігурації і розміру, при яких забезпечується висока ступінь фазового узгодження змішуваних хвиль. У цьому випадку синтез ПФ здійснюється на основі чисельних досліджень  $K_{\phi}$  та інших параметрів доплерівського сигналу на ЕОМ. Область застосування цього методу поширюється на випадки несиметричного прийому в схемах ЛДА.

Якщо розглянути оптичні методи фазової корекції в основному застосовні в ЛДА при вимірюванні швидкості потоків з частинки заданого розміру, то область застосування оптоелектронних методів фазової корекції - синфазного симетричного прийому і багатоканального прийому - поширюється також на потоки з полідисперсними частками. Метод синфазного симетричного прийому заснований на двоканальному або багатоканальному симетричному прийомі, при якому забезпечується формування фазово сполучених доплерівських сигналів з подальшим їх перемноженням і сумуванням в блоці формування синфазних сигналів. При несиметричному прийомі може бути використаний метод багатоканального прийому розсіяного випромінювання на матричній фотоприймач, вихідні доплерівські сигнали з яких після відповідної фазової затримки стають синфазними і потім сумуються. Однак при апаратурній реалізації цього методу схема ЛДА перед кожним виміром має пройти цикл налаштування, в якому слід використовувати потужні лазерні пучки і підвіс частки у вимірювальному обсязі, що ускладнює технічну реалізацію та експлуатацію таких ЛДА.

Розгляд структурних методів поляризаційного узгодження змішаних хвиль у ЛДА, що використовуються під низьким ступенем поляризаційного узгодження і щодо високого ступеню фазового й амплітудного узгодження, показує, що і оптоелектронних методів можливо виділити методи двоканальної та багатоканальної поляризаційної

фільтрації. Метод двоканальної поляризаційної фільтрації застосовний, якщо в ЛДА здійснюється прийом випромінювання в кутовій апертурі, в межах якої зміною стану поляризації двох розсіяних пучків, які можуть мати в загальному випадку довільні еліптичні поляризації, включаючи і взаємно ортогональні, можна знехтувати, тобто якщо рахувати, що  $K_{\Pi} \cong K_{\Pi i}$ . У цьому випадку двоканальна поляризаційна фільтрація оптичних сигналів у поєднанні з фазовим електронним підстроюванням двох сумуючих доплерівських сигналів дозволять отримати доплерівський сигнал, який дорівнює за величиною сигналу, одержуваному при оптичному суміщенні двох розсіяних пучків з узгоджувальними поляризаціями ( $K_{\Pi} = 1$ ), якщо розсіяні пучки є взаємно ортогональні поляризації ( $K_{\Pi} = 0$ ) або лінійні не узгоджені ( $0 < K_{\Pi} < 1$ ), або отримати максимум доплерівського сигналу за рахунок формування двох синфазних доплерівських складових сигналів при еліптичних поляризаціях розсіяних пучків ( $0 \leq K_{\Pi} < 1$ ). Багатоканальну поляризаційну фільтрацію можливо використовувати при прийомі випромінювання в більшій кутовій апертурі. У цьому випадку в ЛДА застосовується  $n$ -число ідентичних пристроїв, кожне з яких реалізує раніше розглянуту двоканальну поляризаційну фільтрацію з подальшим підсумовуванням синфазних доплерівських сигналів.

Тож, судячи з вищезазначеного можливо прийти до висновків, що аналіз параметрів доплерівського сигналу з урахуванням поляризаційно-фазових ефектів розсіювання, що проводиться за допомогою чисельного експериментування на ЕОМ, дозволяє для будь-якої конкретної схема ЛДА після визначення вкладів разового, поляризаційного та амплітудного узгоджень ( $K_{\Phi}$ ,  $K_{\Pi}$ ,  $K_{AI}$ ) на параметри доплерівського сигналу зробити обґрунтований вибір того чи іншого структурного методу фазового, поляризаційного, поляризаційно-фазового або амплітудного узгодження змішуваних хвиль, застосування яких забезпечує високу перешкодостійкість і точність вимірювання швидкості в аерогідродинамічному експерименті.

У другому розділі буде представлена інформація про багатоконпонентні схеми ЛДА для виміру ортогональних проекцій вектора швидкості.

## РОЗДІЛ 2. Багатокомпонентні схеми ЛДА для виміру ортогональних проекцій вектора швидкості

У багатокомпонентних лазерних доплерівських анемометрах диференціального типу використовується кілька зондуючих пучків, що направляються в зону вимірювання, через яку рухається досліджуваний потік рідини або газу. В загальному випадку вектор швидкості потоку може мати довільну орієнтацію в просторі. Тому для визначення напрямлення та модуля вектору швидкості необхідне вимірювання або двох ортогональних проекцій вектору швидкості для двомірних потоків, або трьох ортогональних проекцій вектору швидкості в разі дослідження тримірних потоків рідини або газу.

Якщо в зону вимірювання направити три, чотири або п'ять пучків однієї довжини хвилі, то при прийомі розсіяного випромінювання на один фотоприймач, на виході його формуються відповідні 3, 6 або 10 високочастотних доплерівських сигналів, на частотах пропорційних проекцій векторів швидкості на вектор рівний відповідній різниці хвильових векторів кожної пари зондуючих пучків. Таким чином, на виході фотоприймача крім корисних сигналів, що несуть інформацію про ортогональні проекції вектору швидкості, присутні також, так звані, перехресні перешкоди. Причому частотні спектри корисних сигналів і перехресних перешкод можуть перекриватися, що істотно ускладнює виділення сигналів з перешкод і призводять до неоднозначності вимірювань проекцій вектору швидкості. Для виключення впливу перехресних перешкод на результат вимірювання може бути використана поляризаційна селекція сигналів, яка використовується в серійно випущених двокомпонентних схемах ЛДА з трьома зондуючими пучками типу LDA – 08 і TSI – 9200-9.

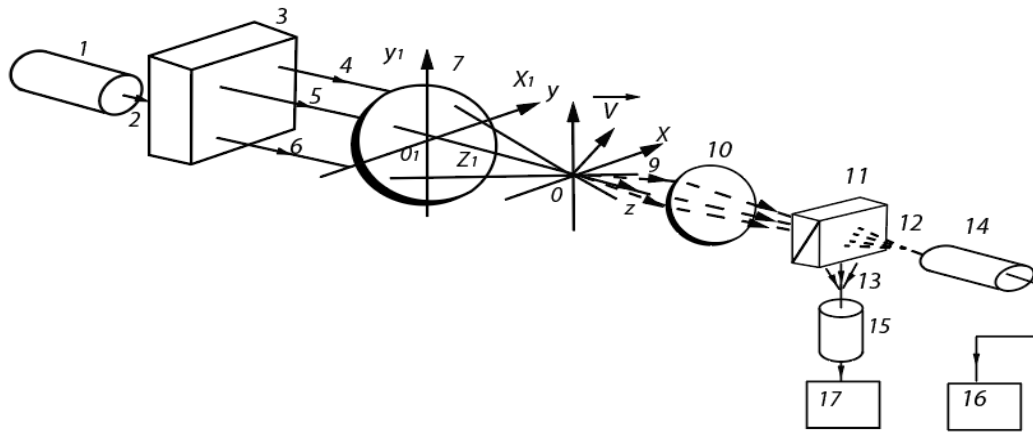
Проте теоретичні та експериментальні дослідження відомих

<i>Кафедра авіоніки</i>				НАУ 22 11 21 000 ПЗ			
<i>Виконав</i>	Середюк О.О.			Діагностування авіаційної техніки за допомогою лазерного доплерівського вимірювача швидкості	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	Землянський В.М					79	67
<i>Консульт.</i>					<b>173 «Авіоніка»</b>		
<i>Н-контр.</i>	Левківський В.В.						
<i>Зав. каф.</i>	Павлова С.В.						

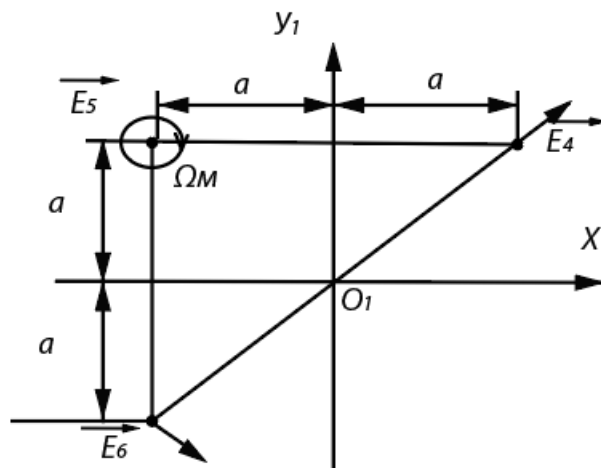
двокомпонентних схем ЛДА з поляризаційним роздвоєнням каналів показують, що вони достатньо ефективно працюють лише при прийомі розсіяного під малими кутами вперед випромінювання, коли не спостерігається зміна стану поляризації випромінювання, розсіяного на частках рухомих з потоком, що, відповідно, визиває обмежену область їх практичного застосування. Ці схеми ставляться мало- ефективним з точки зору придушення перехрещених перешкод при прийомі розсіяного назад випромінювання, так як в цьому випадку, як правило, спостерігається суттєва зміна стану поляризації розсіяних пучків. Розглянемо шляхи підвищення ефективності поляризаційної селекції сигналів в багатокомпонентних схемах ЛДА з прийомом розсіяного назад випромінювання, враховуючи як поляризаційно-фазові ефекти розсіяння, так і властивості симетрії просторової структури доплерівського сигналу.

### **2.1. Двокомпонентна схема ЛДА з поляризаційною селекцією сигналів для вимірювання проекцій швидкості $V_x$ і $V_y$ при прийомі розсіяного вперед і назад випромінювання.**

Для вимірювання двох ортогональних проекцій вектора швидкості двомірних потоків у площині перпендикулярної оптичної осі схеми може бути використана схема ЛДА (рис.2.1) з трьома зондуючими пучками, в якій здійснюється поляризаційна селекція розсіяного вперед випромінювання. Газовий лазер безперервної дії  $I$  випромінює лінійно поляризований



а)



б)

Рис.2.1. Схема ЛДА

когерентний пучок 2, який поступає на вхід оптичного блоку 3, на виході котрого формуються три зондуєчих пучка 4,5 і 6 розташованих попарно симетрично відносно площин  $O_1X_1Z_1$  і  $O_1Y_1Z_1$ , що розповсюджуються паралельно оптичній осі схеми  $OZ$  (рис.2.1. б)). Пучки 4,5 і 6 на виході оптичного блоку 3 мають різні стани поляризації: пучки 4 і 6 – лінійні з азимутами відповідно  $\varphi_4 = 45^\circ$  і  $\varphi_6 = -45^\circ$ , а пучок 5 –

правоциркулярну або лінійну з  $\int_5 = 0$  або  $\int_5 = 90^\circ$  поляризацію. Крім того, пучок 5 має фіксований зсув частоти  $\Omega_M$  по відношенню до пучків 4 та 6, тобто в блоці 3 встановлені як фазові пластини так і частозсувний пристрій. Три зондуєчих пучки 4,5 і 6 фокусуються об'єктивом 7 в зону виміру 8, через котру рухаються двомірний потік вектор швидкості  $\vec{V}$  котрий орієнтований в площині  $O Y X$ .

При заданій геометрії зондуєчих пучків (рис.2.2) і виконанні умови  $2 \sin^2 \gamma_1 / 2 = \sin^2 \gamma_2 / 2$  де  $\gamma_1$  – кут між зондуєчими пучками 4, 5 і 6,  $\gamma_2$  – кут між зондуєчими пучками 4 та 6 в результаті оптичного суміщення на фотоприймачі розсіяного випромінювання від трьох пучків 4,5 і 6, на виході його формуються три високочастотних складових сигналу на наступних різницевих доплерівських частотах:

$$W_{g1} = \Omega_M - \vec{K}_{01} \vec{V}, \quad W_{g2} = \Omega_M - \vec{K}_{02} \vec{V}, \quad W_{g3} = \Omega_M - \vec{K}_{03} \vec{V},$$

$$\vec{K}_{01} = \vec{K}_5 - \vec{K}_6, \quad \vec{K}_{02} = \vec{K}_5 - \vec{K}_4, \quad \vec{K}_{03} = \vec{K}_4 - \vec{K}_6,$$

де  $\vec{K}_4, \vec{K}_5$  і  $\vec{K}_6$  – хвильові вектори відповідних зондуєчих пучків.

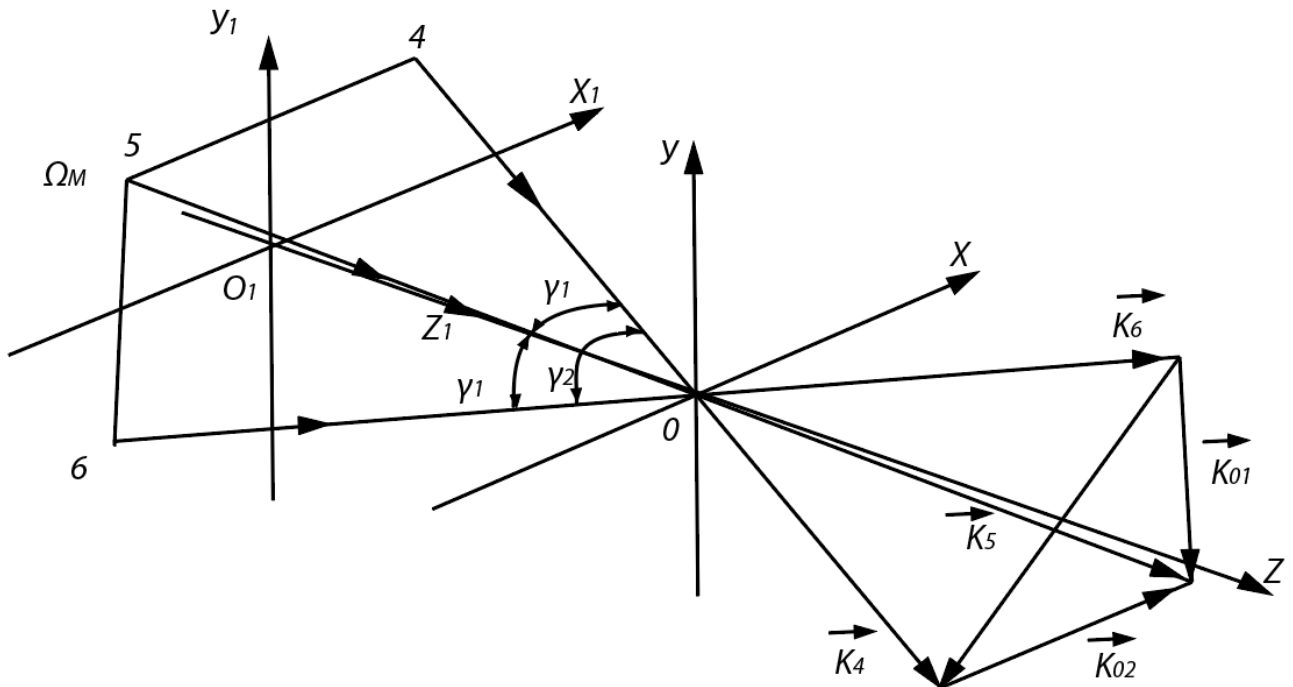


Рис.2.2. Проекції вектора швидкості  $V_x$  і  $V_y$



Таким чином сигнали в частотах  $W_{g1}$  і  $W_{g2}$  дають інформацію про дві ортогональні проекції вектора швидкості  $V_x$  і  $V_y$ , а сигнал на частоті  $W_{g3}$  пропорційній проекції вектора швидкості на різнісний хвильовий вектор  $\vec{K}_{03}$  – являється перехресною похибкою. Для придушення перешкод на частоті  $W_{g3}$  і здійснення однозначного виміру двох ортогональних проекцій швидкості в ЛДА розсіяне вперед випромінювання 9 збирається об'єктивом 10 і далі направляється на вхід поляризованого розщеплювача 11, котрий пропускає лінійно поляризовану під кутом  $45^\circ$  компоненту розсіяного випромінювання 12 на фотоприймач 14, а лінійно поляризовану під кутом  $-45^\circ$  компоненту - 13- на фотоприймач 15. Якщо прийом розсіяного вперед випромінювання здійснювана в просторовій області прийому, де не спостерігається зміна стану поляризації розсіяного випромінювання від пучків 4 і 6, то на виході фотоприймача 14 формується складова сигналу на частоті  $W_{g2}$ , що поступає на вхід вимірювача доплерівських частот 16, а на нахід фотоприймача 17 – складова сигналу на частоті  $W_{g1}$ , яка поступає на вхід вимірювача доплерівських частот 17. Вимірювачі 16 і 17 видають відповідно інформацію про знак і модулі проекцій вектора швидкості  $V_x$  і  $V_y$ . Поляризаційний поділ двох каналів вимірювання в розглянутій схемі можна здійснити достатньо афективно при прийомі розсіяного під малими кутами випромінювання, тобто, наприклад вісь прийомної оптики співпадають з оптичною віссю схеми. Якщо вісь прийомної оптики складає великий кут з віссю схеми і, крім того, лежить в площині, що проходить через вісь схеми та орієнтованої перпендикулярно площині пучків 4 та 6, то в цьому випадку при прийомі розсіяного вперед випромінювання вже спостерігається помітна зміна стану поляризації розсіяних пучків. Ще в більш значній ступені зміни стану поляризації випромінювання спостерігається при прийомі розсіяного назад випромінювання в просторовій області, яка лежить поблизу площини, що проходить через вісь схеми і розташованої перпендикулярно площині пучків 4 та 6. Тому в цих випадках в схемі ЛДА (рис.2.1) різко знижається ефективність поляризаційної селекції і на виході фотоприймачів 14 та 15 крім корисних сигналів з'являються також перехресні

перешкоди на частоті  $W_{g3}$ . Для суттєвого зменшення перехресної перешкоди при прийомі розсіяного назад випромінювання або при прийомі розсіяного вперед випромінювання під кутом до осі схеми в приймальному каналі схеми ЛДА (рис.2.3.) повинна бути встановлена діафрагма 18 з доцільним отвором  $2axb$ , яка забезпечує прийом розсіяного випромінювання поблизу зондуючих пучків 4 та 6. Аналіз роботи схеми ЛДА на основі теорії розсіяння показує, що якщо зондуючі пучки 4 та 6 мають лінійні взаємно ортогональні поляризації з коливанням електричних векторів відповідно в площині і перпендикулярно площині пучків 4 і 6 (рис.2.3. б)), то при прийомі розсіяного випромінювання в межах отвору щилиноподібної діафрагми 18 коефіцієнт поляризаційного узгодження двох змішаних пучків рівний нулю. Тому тільки в цьому випадку в схемі ЛДА (рис.2.3.) буде спостерігатись ефективна поляризаційна селекція розсіяного випромінювання, що забезпечується придушення перехресної перешкоди на частоті  $W_{g3}$ .

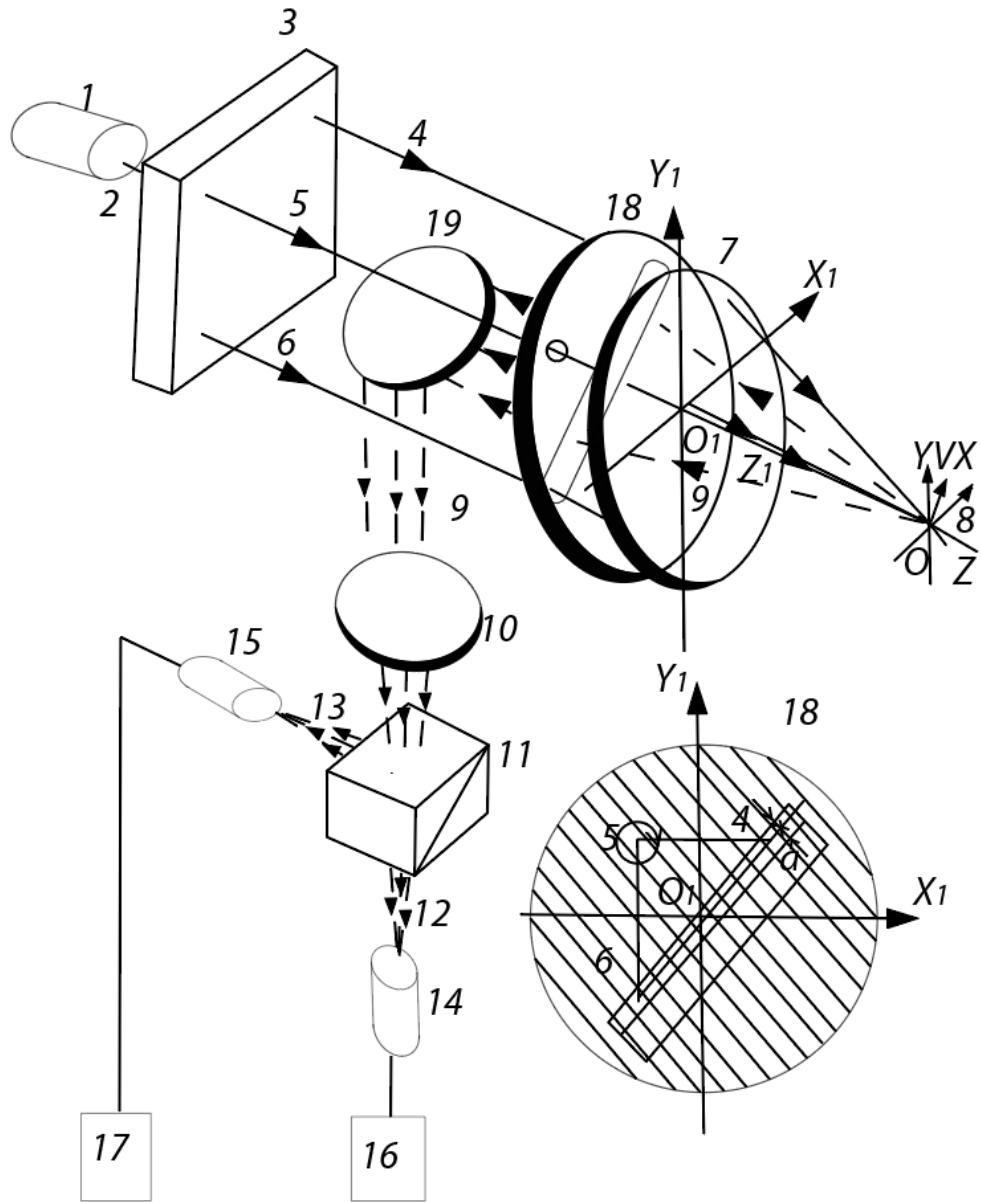


Рис.2.3. Схема ЛДА з ефективною поляризацією

**2.2. Двокомпонентна схема ЛДА з поляризаційною селекцією сигналів для виміру проекцій швидкості  $V_x$  і  $V_y$  при прийомі розсіяного вперед випромінювання.**

Другий варіант двокомпонентної схеми ЛДА з поляризаційною селекцією розсіяного випромінювання представлено на (рис.2.4.). Відміною особливістю цієї

схеми являється те, що оптичний блок 3 формує чотири зондуєчих пучки 4,5,6 і 7 розташованих попарно симетрично відносно площин  $O_1X_1Z_1$  і  $O_1Y_1Z_1$  (рис.2.4.б)). Причому зондуєчі пучки 4 і 6 мають, наприклад, горизонтальну поляризацію, а пучки 5 і 7 – вертикальну поляризацію. Крім того пучок 5 має фіксований зсув частоти  $\Omega_{M1}$ , а пучок 6 – суміщений за частотою на величину  $\Omega_{M2}$ . Чотири паралельних пучки 4,5,6 і 7 фокусується об'єктивом 8 в зону вимірювання 9, через котру проходить потік рідини або газу, вектор швидкості  $\vec{V}$  котрий орієнтований в площину  $OXY$ . Розсіяне вперед випромінювання 10 збирається поблизу оптичної осі схеми об'єктивом 11 і далі направляється на вхід поляризаційного розщеплювача 12, котрий пропускає горизонтально поляризоване розсіяне випромінювання 13 від пучків 4 та 6 на фотоприймач 15, а вертикально поляризоване розсіяне випромінювання від пучків 5 та 7 – на фотоприймач 16. Якщо в схемі ЛДА забезпечується прийом випромінювання в просторовій області, для котрої не спостерігається змін стану поляризації випромінювання при розсіянні на частотах, то як слідує з геометрії зондуєчих пучків представленої на (рис.2.5.) на виході фотоприймача 15 формується високочастотний сигнал на частоті  $W_{g1} = \Omega_{M2} - \vec{K}_{01}\vec{V}$ , а на виході фотоприймача 16 – сигнал на частоті  $W_{g2} = \Omega_{M1} - \vec{K}_{01}\vec{V}$ , де  $\vec{K}_{01} = \vec{K}_6 - \vec{K}_4$ ,  $\vec{K}_{02} = \vec{K}_5 - \vec{K}_7$ .

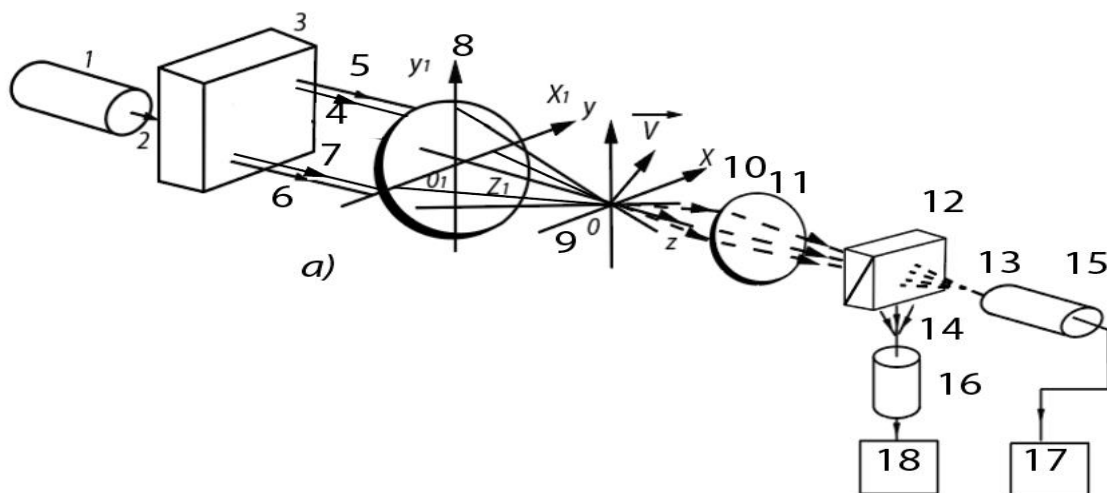


Рис.2.4(а). Схема ЛДА з поляризаційною селекцією

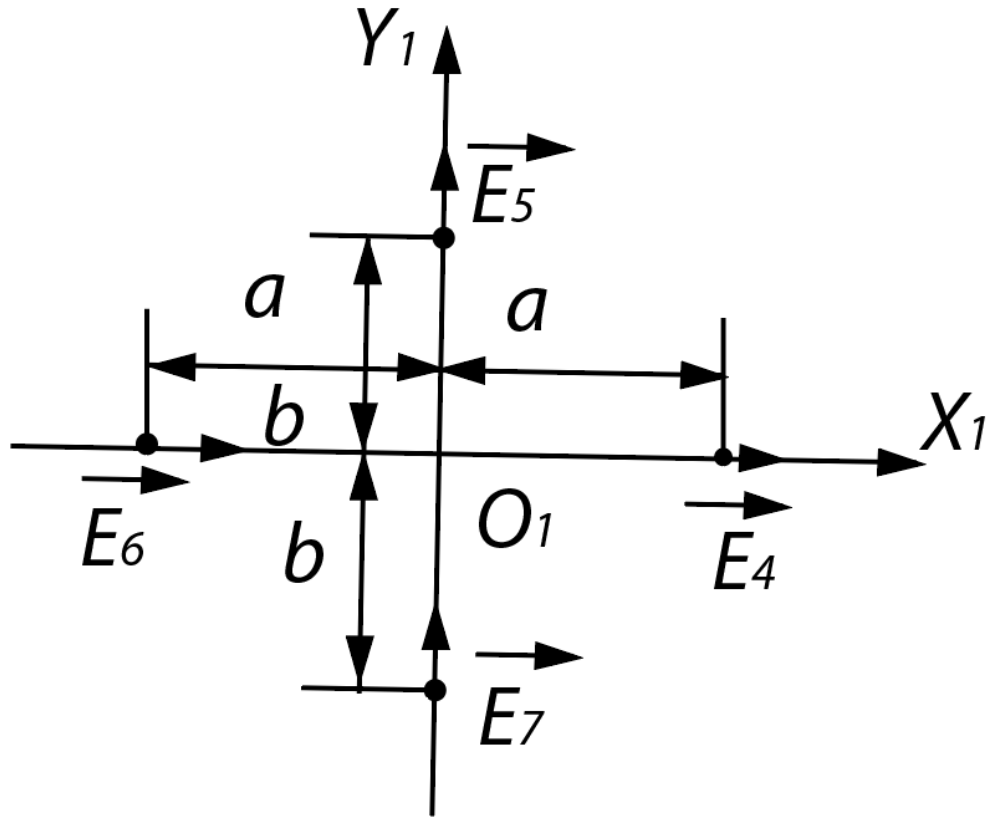


Рис.2.4(б). Схема ЛДА з поляризаційною селекцією

Що стосується високочастотних завад на частотах

$$W_{g3} = (\vec{K}_7 - \vec{K}_4)\vec{V}, \quad W_{g4} = \Omega_{M1} - (\vec{K}_5 - \vec{K}_4)\vec{V},$$

$$W_{g5} = \Omega_{M2} - \Omega_{M1} - (\vec{K}_6 - \vec{K}_5)\vec{V}, \quad W_{g6} = \Omega_{M2} - (\vec{K}_6 - \vec{K}_7)\vec{V},$$

то для розглянутого випадку спостерігається поляризаційна фільтрація цих перехресних похибок. Оскільки різнісні хвильові вектора  $\vec{K}_{01}$  і  $\vec{K}_{02}$  (рис.2.5.) паралельні відповідно осям  $OX$  і  $OY$ , то доплерівський сигнал на частоті  $W_{g1}$  несе інформацію про знак і модулі проекції вектора швидкості  $V_x$ , а сигнал на частоті  $W_{g2}$  – про проекцію вектора швидкості  $V_y$ .

Доплерівські сигнали на частотах  $W_{g1}$   $W_{g2}$  з виходів фотоприймачів 15 і 16 надходять відповідно до вимірювальних доплерівських частот 17 і 18, видають інформацію про дві ортогональні проекції вектора швидкості. Слід зазначити, що

двокомпонентна схема ЛДА з чотирма зондуючими пучками не може бути використана в ситуаціях, коли вісь приймальної оптики складає значний кут з віссю схеми  $OZ$ , включаючи у разі прийому розсіяного назад та вперед випромінювання. Оскільки в цьому випадку, як вже зазначалося вище, може спостерігатися значна зміна поляризації розсіяних пучків, що викликає появу на виході фотоприймачів 15 і 16 перехресних перешкод на частотах  $W_{g3}, W_{g4}, W_{g5}$  і  $W_{g6}$ . Однак схема (рис.2.4.) зберігає свою працездатність при прийомі розсіяного назад випромінювання в малій кутовій апертурі обмеженої діафрагмою з круглим отвором (рис.2.6.), центр якого збігається з віссю схеми. Оскільки, як випливає з аналізу схеми ЛДА на основі теорії розсіювання тільки при спостереженні розсіяного назад випромінювання вздовж осі схеми не спостерігається зміна змінити стан поляризації випромінювання розсіяного одночасно від 4 зондуючих пучків 4,5,6 і 7. Для інших напрямів прийому цієї умови вже й не виконуються та ефективність поляризаційної селекції сигналів у схемі ЛДА різко знижується.

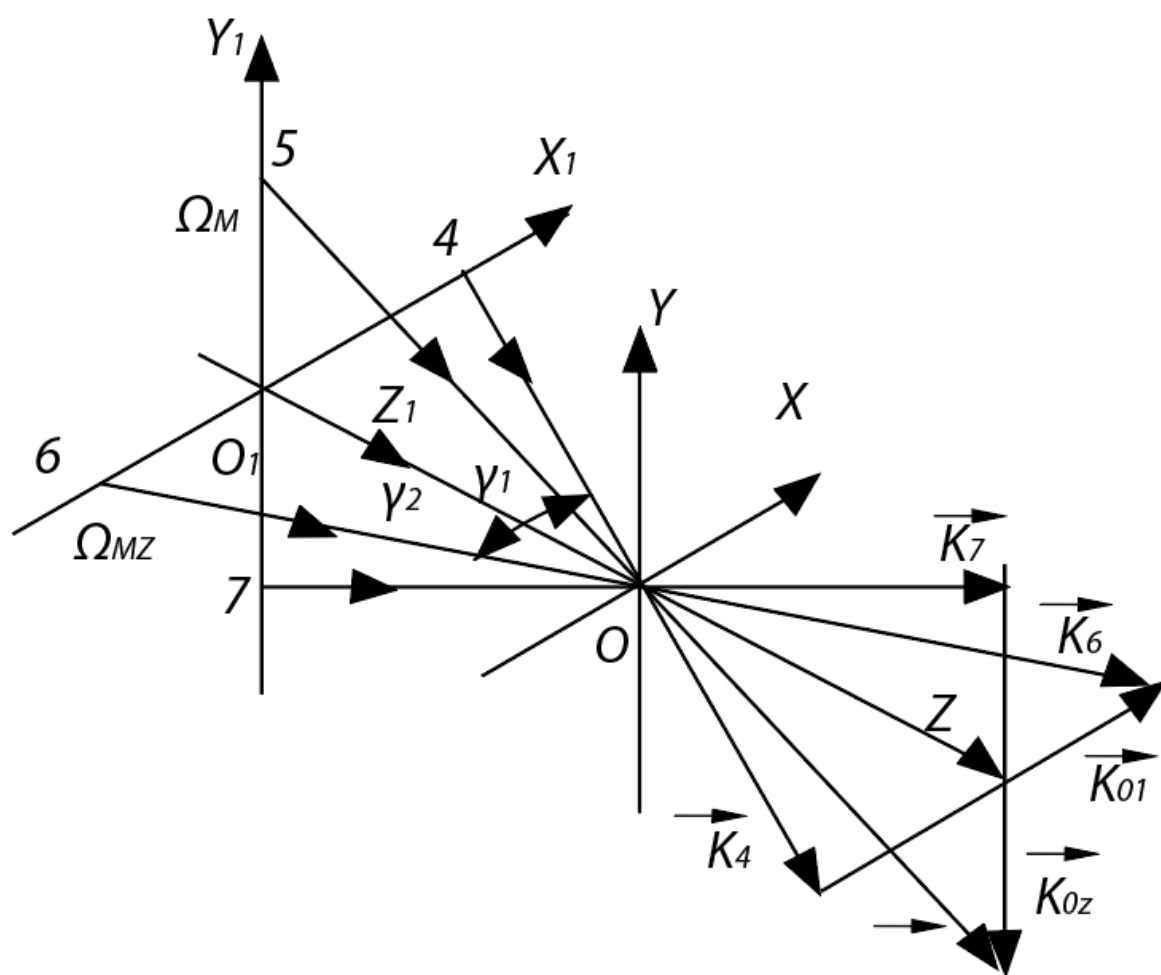


Рис.2.5. Геометрія зондуєчих пучків

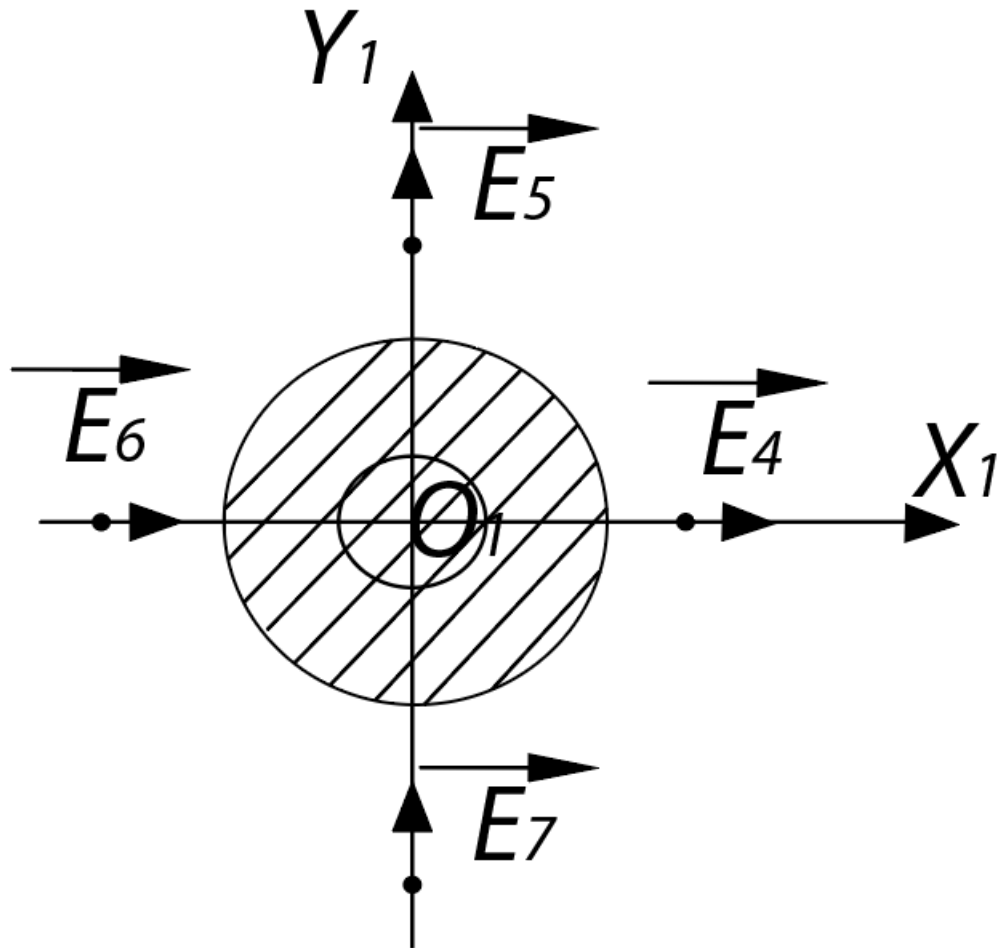


Рис.2.6. Мала кутова апертура обмеженою діафрагмою з круглим отвором

Отже, для вимірювання двох ортогональних проєкцій вектора швидкості двомірних потоків у площині перпендикулярної оптичної осі схеми може бути використана схема ЛДА з трьома зондуєчими пучками, в якій здійснюється поляризаційна селекція розсіяного вперед випромінювання.

У третьому розділі будуть розглянуті параметри доплерівського сигналу в двокомпонентних ЛДА.



### РОЗДІЛ 3. Параметри доплерівського сигналу в двокомпонентних ЛДА

В багатокомпонентних схемах ЛДА з прийомом розсіяного назад випромінювання у великій кутовій апертурі більш ефективним є використання для придушення перехресних перешкод симетричного прийому розсіяного випромінювання, принцип дії якого заснований на обліку поляризаційно-фазових ефектів розсіювання, що спостерігаються в диференціальній схемі ЛДА з зондуючими пучками, що мають різні стани поляризації.

Розглянемо принципи побудови таких багатокомпонентних схем ЛДА для різних геометрії зондувальних пучків при використанні сферичних розсіювальних часток, що виникають в випадках одночасткового режиму роботи.

#### 3.1. Симетричний прийом розсіяного випромінювання щодо площини зондувальних пучків $O_1X_1Y_1$

Нехай у двокомпонентній схемі ЛДА з геометрією оптичної схеми використовуються три зондувальні пучки 4,5 і 6, що мають різні стани поляризації. Причому зондуючий пучок 4 має лінійну поляризацію з азимутом  $\zeta_4 = 45^\circ$ , а пучок 5 – правоциркулярну поляризацію, пучок 6, маючий фіксований зсув частоти -  $\Omega_M$  – лінійну поляризацію з азимутом  $\zeta_6 = -45^\circ$ . Пучки 4 і 6, маючи лінійні взаємно ортогональні поляризації, розташовані в так званій площині пучків 4-6, орієнтовані під кутом  $45^\circ$  і площині  $OXZ$ . Прийом розсіяного випромінювання здійснюється в межах отвору приймальної діафрагми Д, що має вісь симетрії, що розташована в площині пучків 4-6. У загальному випадку прийомна діафрагма Д може мати отвір довільної форми, проте при цьому слідує обов'язково розташовувати вісь симетрії діафрагми в площі пучків, що мають лінійні взаємно ортогональні поляризації.

<i>Кафедра авіоніки</i>			НАУ 22 11 21 000 ПЗ			
<i>Виконав</i>	Середюк О.О.		Діагностування авіаційної техніки за допомогою лазерного доплерівського	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	Землянський В.М.				ЛП	67
<i>Консульт.</i>				<b>173 «Авіоніка»</b>		
<i>Н-контр.</i>	Левківський В.В.					
<i>Зав. каф.</i>	Павлова С.В.					

Якщо прийом розсіяного випромінювання здійснюється в межах діафрагми з круглим отвором, то при прийомі випромінювання на один фотоприймач сигнал на його виході можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 i(t) = & \left\{ \int_0^f \int_0^{2\pi} I_{5i} r^2 \sin^2 \alpha d\alpha d\varepsilon + 2 \int_0^f \int_0^\pi (I_{41i} + I_{62i}) r^2 \sin^2 \alpha d\alpha d\varepsilon + \right. \\
 & 2K_{\text{пф}45} \int_0^f \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i} I_{5i}} r^2 \sin^2 \alpha d\alpha d\varepsilon \cos(\vec{K}_{02} \vec{V} t - \Phi_{g45}) + \\
 & 2K_{\text{пф}56} \int_0^f \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{5i} I_{6i}} r^2 \sin^2 \alpha d\alpha d\varepsilon \cos[(\Omega_M - \vec{K}_{01} \vec{V}) t - \Phi_{g56}] + \\
 & \left. 2K_{\text{пф}46} \int_0^f \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i} I_{6i}} r^2 \sin^2 \alpha d\alpha d\varepsilon \cos[(\Omega_M - \vec{K}_{03} \vec{V}) t - \Phi_{g46}] \right\} (1)
 \end{aligned}$$

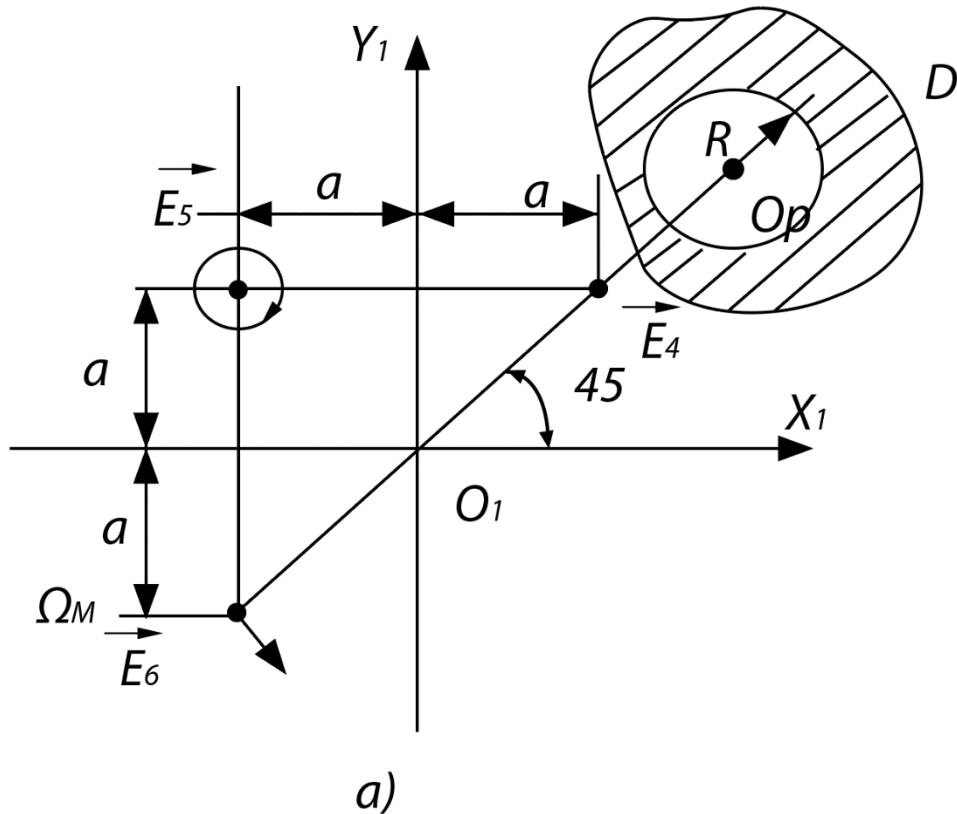


Рис.3.1(а). Виміри різних станів поляризації

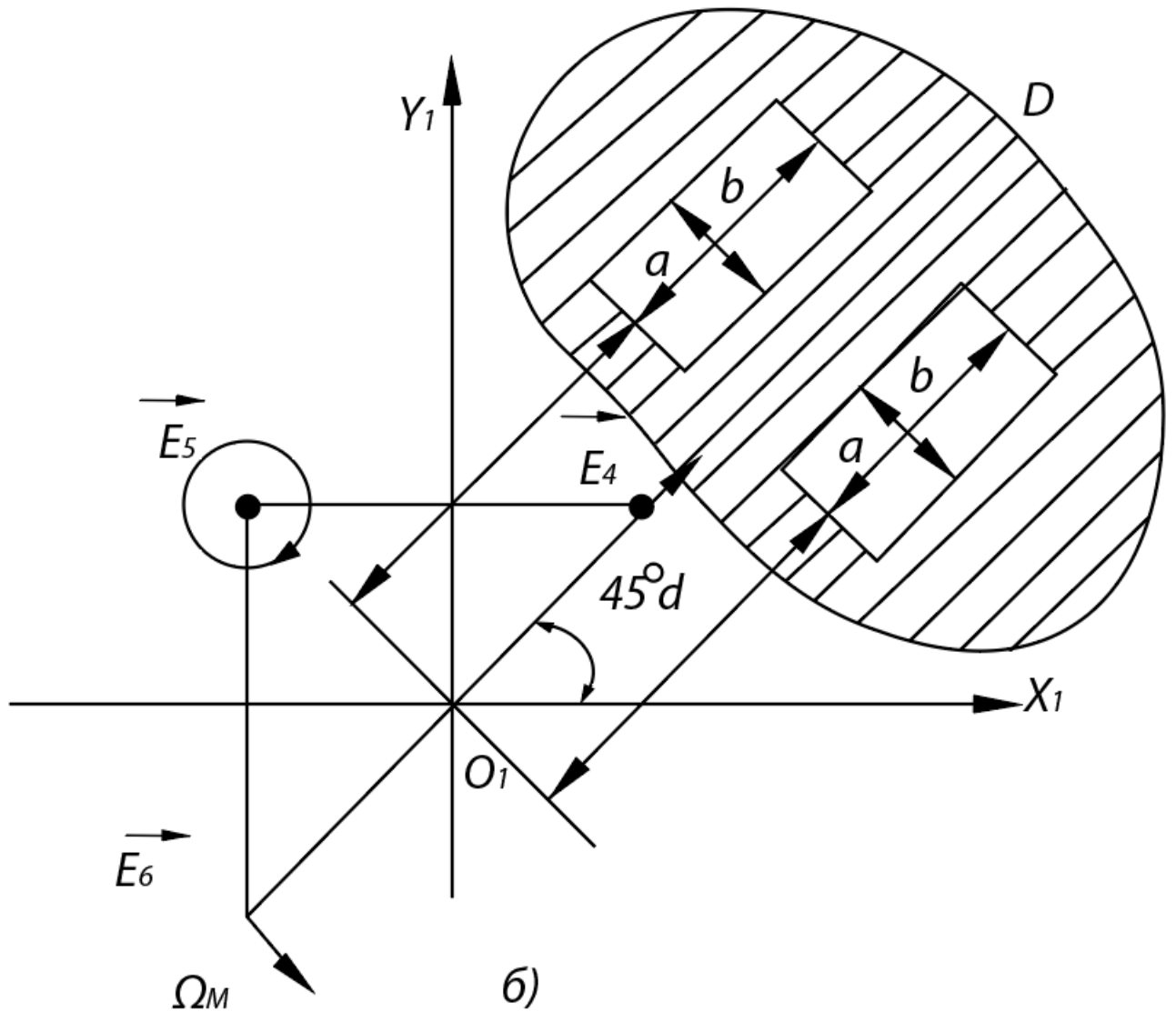


Рис.3.1(б). Виміри різних станів поляризації

де  $K_1 = \frac{e\eta M}{h\nu}$ ,  $e$  – заряд електрона,  $\eta$  – квантова ефективність фотоприймача,  $M$  – коефіцієнт внутрішнього посилення,  $h$  – постійна Планка,  $\nu$  – частота випромінювання лазера,  $\int$  – кутова апертура приймальної діафрагми,  $I_{4i}I_{5i}I_{6i}$  – інтенсивності розсіяного випромінювання в  $i$  – напрямку, утвореного при випромінюванні рухомої частки відповідно 4,5 і 6 зондуючими пучками,  $r$  – відстань від розсіяної частки до  $i$  – точки спостереження розсіяного випромінювання,  $K_{\text{пфке}}$  – коефіцієнт поляризаційно-фазового узгодження змішаних розсіяних пучків, які утворюються при випромінюванні частки

«K» - м і «e» - м зондуєчими пучками,  $\Phi_{g_{ке}}$  – фаза високочастотної складової доплерівського сигналу, який утворюється при випромінюванні частки «K» і «e» - зондуєчими пучками.

Таким чином вихідний сигнал фотоприймача в загальному випадку містить низькочастотну складову та три високочастотних доплерівських складових, що мають різні частоти.

Для розглянутого випадку симетричного прийому розсіяного випромінювання щодо площини пучків 4-6, третя високочастотна складова сигналу на частоті  $W_{g3} = \Omega_M - \overrightarrow{K_{03}}\overrightarrow{V}$ , є перехресною завадою дорівнює нулю внаслідок того, що  $K_{пф46} = 0$  незалежно як від кута між зондуєчими пучками 4 і 6, так і параметрів розсіювальних часток. Це пояснюється наступним чином. Відомо, що коефіцієнт поляризаційно-фазового узгодження  $K_{пф46}$  дорівнює нулю вироблення коефіцієнта фазового узгодження  $K_{ф46}$  на інтегральний коефіцієнт поляризаційного узгодження. Якщо зондуєчі пучки мають лінійні взаємно ортогональні поляризації, то при прийомі розсіяного назад випромінювання  $K_{пн} \neq 0$  і може прицмати відносно високе значення.

Що відносно коефіцієнта фазового узгодження, то  $K_{ф} = 0$ , так як якщо два зондуєчих пучки мають лінійні взаємно ортогональні поляризації з коливанням електричних векторів відповідно в площині пучків і перпендикулярно цій площині, то для двох довільних напрямках прийому симетричних відносно площини пучків доплерівські сигнали рівні за амплітудою і знаходяться в протифазі. Це і визиває взаємокомпенсацію перехресної завади при симетричному прийомі розсіяного випромінювання відносно площини пучків 4-6. З урахуванням сказаного вихідний сигнал фотоприймача можна записати  $i(t) = I_0 + I_{45} \cos(\overrightarrow{K_{02}}\overrightarrow{V}t - \Phi_{g_{45}}) + I_{56} \cos[(\Omega_M - \overrightarrow{K_{01}}\overrightarrow{V})t - \Phi_{g_{56}}]$   $\overrightarrow{K_{01}}\overrightarrow{V} = \frac{4\pi}{\lambda} sm \frac{\gamma}{2} V_y$ ;  $\overrightarrow{K_{02}}\overrightarrow{V} = \frac{4\pi}{\lambda} sm \frac{\gamma}{2} V_x$  (2)

де  $\gamma$  – кут між зондуєчими пучками 4,5 і 5,6.

Як слідує з (2) при відповідному виборі здвигу частоти  $\Omega_M$  частотні спектри двох доплерівських високочастотних складових сигналу фотоприймача не перекривається, що дозволяє здійснювати електричну фільтрацію, вицупити два корисних сигнали, несучих інформацію з двох взаємно ортогональних проекціях вектора швидкості. На (рис. 3.1(б)) представлений один з варіантів виконання прийомної діафрагми з двома отворами однакової форми, розташованими симетрично відносно площини пучків 4-6. В цьому випадку також буде спостерігатися подавлення перехресної похибки від пучків 4-6, якщо розсіяне випромінювання, збирається в межах двох отворів діафрагми направляти на один фотоприймач. Така конструкція прийомної діафрагми з двома симетричними отворами довільної форми може бути використана, наприклад, при створенні компактної в конструктивному відношенні схеми ЛДА ( $d=0$ ), що має високим просторовою роздільною здатністю і призначеної для виміру швидкості віддалених повітряних потоків.

Розглянемо двокомпонентну схему ЛДА з трьома зондуєчими пучками 4,5 і 6 в площині  $O_I X_I Y_I$ , в котрому використовується геометрія оптичної схеми, представлена раніше. Пучок 4 має вертикальну поляризацію, пучок 5 – суміщений за частотою на  $\Omega_M$ , - правоциркулярну, а пучок 6 – горизонтальну поляризацію. Нехай розсіяне назад випромінювання збирається в межах отвору прийомної діафрагми має вісь симетрії, розташована в площині  $O_I X_I Y_I$  і далі направляється на фотоприймач. При прийомі розсіяного випромінювання, наприклад, в межах діафрагми з круглим отвором в результаті оптичного суміщення трьох розсіяних пучків на виході фотоприймача

формується сигнал

$$i(t) = K_1 \left\{ 2 \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} (I_{4i} + I_{51i} + I_{52i} + I_{6i}) r^z s m_{\int} d_{\int} d\varepsilon + \right.$$

$$4K_{\text{пф}45}^{22} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i} I_{52i}} r^z m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_M - \overrightarrow{K_{01}} \vec{V})t - \Phi_{g45}^{22}] +$$

$$2K_{\text{пф}45}^{21} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i} I_{51i}} r^z m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\overrightarrow{\Omega_M} - \overrightarrow{K_{01}} \vec{V})t - \Phi_{g45}^{21}] +$$

$$4K_{\text{пф}46}^{11} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{5i} I_{6i}} r^z s m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos(\overrightarrow{K_{02}} \vec{V} t - \Phi_{g56}^{11}) +$$

$$2K_{\text{пф}56}^{21} \int_0^d \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{52i} I_{6i}} r^z \sin \delta \epsilon \cos(\vec{K}_{02} \vec{V} t - \Phi_{g56}^{21}) +$$

$$K_{\text{пф}46} \int_0^d \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i} I_{6i}} r^z \sin \delta \epsilon \cos[(\Omega_M - \vec{K}_{03} \vec{V}) t - \Phi_{g46}] \} (3)$$

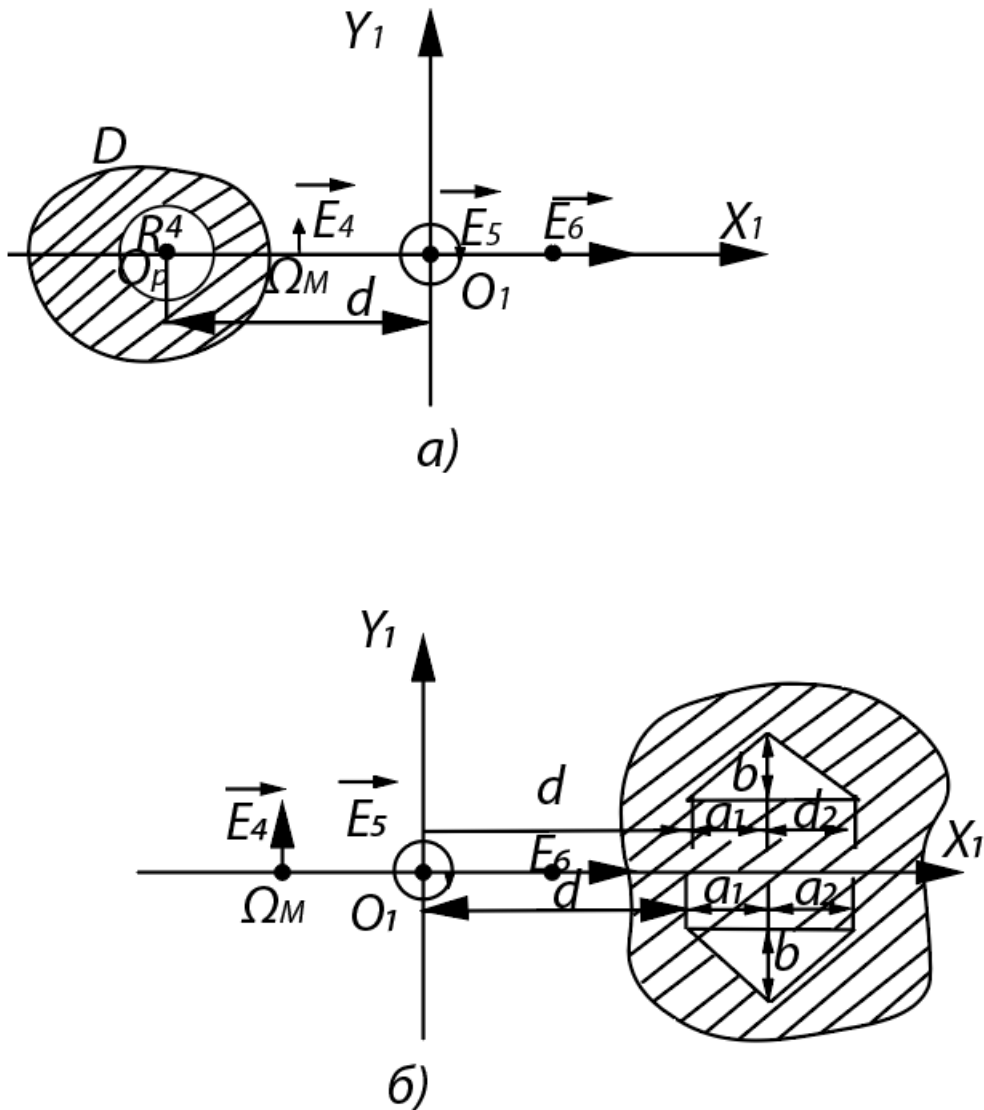


Рис.3.2. Зображення діафрагми з круглим отвором

де  $I_{51i} I_{52i}$  – інтенсивності розсіяного випромінювання в  $i$  – напрямки, які виникають при випромінюванні рухомих часток відповідно «х» і «у» - компонентами електричного поля 5-го зондуючого пучка,  $K_{\text{пф}45}^{22}$  – коефіцієнт поляризаційно-фазового узгодження змішаних пучків, які виникають при випромінюванні частки «у» - компонентами електричного поля четвертого і п'ятого зондуючих пучків. При симетричному прийомі

розсіяного випромінювання відносно площини  $O_1X_1Y_1$  :  $K_{\text{пф}45}^{21} = K_{\text{пф}56}^{21} = K_{\text{пф}46} = 0$ , так як  $K_{\text{ф}45}^{z1} = K_{\text{пф}56}^{z1} = K_{\text{ф}46} = 0$ , тобто спостерігається взаємокомпенсація перехресної похибки і складових сигналу від лінійно взаємно ортогональних компонент зондуючих пучків, тому сигнал (3) можна записати

$$\begin{aligned}
 i(t) = & 2K_1 \left\{ \int_0^{\int} \int_0^{\pi} (I_{4i} + I_{51i} + I_{52i} + I_{6i}) r^z s m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \right. \\
 & + 2K_{\text{пф}45}^{22} \int_0^{\int} \int_0^{\pi} \sqrt{I_{4i} I_{52i}} r^z m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_M - \overrightarrow{K_{01}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}^{22}] \\
 & \left. + 2K_{\text{пф}45}^{11} \int_0^{\int} \int_0^{\pi} \sqrt{I_{51i} I_{6i}} r^z m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos(\overrightarrow{K_{02}} \overrightarrow{V}t - \Phi_{g56}^{11}) \right\} \\
 = & I_0 + I_{45} \cos[(\Omega_M - \overrightarrow{K_{01}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}^{22}] + I_{56} \cos(\overrightarrow{K_{02}} \overrightarrow{V}t - \Phi_{g56}^{11}) \quad (4)
 \end{aligned}$$

Таким чином на виході фотоприймача присутні два високочастотні доплерівські сигнали, частотні спектри котрих не перекриваються. Ці два доплерівських сигнали можна відфільтрувати, використовуючи їх в майбутньому для виявлення двох ортогональних проекцій вектора швидкості. Приймальна діафрагма може мати довільну форму, забезпечуючи однак симетричний прийом відносно площини  $O_1X_1Z_1$ , так як тільки в цьому випадку буде спостерігатись ефективно подавлення перехресної завади від пучків 4 і 6, незалежно від параметрів розсіяних часток. Вісь приймальної оптики може співпадати з оптичною віссю схеми  $d=0$  або діафрагма може містити два однакових отвори, розташованих симетрично відносно площини пучків.

Розглянемо двокомпонентну схему ЛДА, призначену для виміру двох ортогональних проекцій вектора швидкості  $V_x$  і  $V_z$ , в котрій використовується геометрія зондуючих пучків, представлена на (рис.3.3). Нехай зондуючі пучки 4 і 5 мають вертикальну поляризацію, а пучки 6 і 7 – горизонтальну поляризацію. При проходженні частки через зону виміру розсіяного назад випромінювання збирається в межах отвору

діафрагми, маючого вісь симетрії в площині  $O_1X_1Z_1$ , і направляючу на фотоприймач. Якщо приймальна діафрагма має круглий отвір, то сигнал на виході фотоприймача з урахуванням властивостей симетрії просторової структури доплерівського сигналу описується вираженням

$$\begin{aligned}
 i(t) = K_1 \left\{ 2 \int_0^1 \int_0^\pi (I_{4i} + I_{51i} + I_{52i} + I_{6i} + I_{7i}) r^z s m_{\xi} d_{\xi} d\varepsilon \right. \\
 + 4K_{\text{пф}45} \int_0^1 \int_0^\pi \sqrt{I_{4i}I_{5i}} r^z m_{\xi} d_{\xi} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M2} - \overrightarrow{K_{01}}\overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}] \\
 + 4K_{\text{пф}67} \int_0^1 \int_0^\pi \sqrt{I_{6i}I_{7i}} r^z m_{\xi} d_{\xi} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M1} - \overrightarrow{K_{02}}\overrightarrow{V})t - \Phi_{g67}] \\
 + 2K_{\text{пф}46} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i}I_{6i}} r^z s m_{\xi} d_{\xi} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M1} - \Omega_{M2} - (\overrightarrow{K_6} - \overrightarrow{K_4})t - \Phi_{g46})] \\
 + 2K_{\text{пф}47} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i}I_{7i}} r^z s m_{\xi} d_{\xi} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M2} - (\overrightarrow{K_4} - \overrightarrow{K_7})\overrightarrow{V})t - \Phi_{g47}] \\
 + 2K_{\text{пф}56} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{5i}I_{6i}} r^z s m_{\xi} d_{\xi} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M1} - (\overrightarrow{K_6} - \overrightarrow{K_5})\overrightarrow{V})t - \Phi_{g56}] \\
 \left. + 2K_{\text{пф}57} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{5i}I_{7i}} r^z s m_{\xi} d_{\xi} d\varepsilon \cos[(\overrightarrow{K_5} - \overrightarrow{K_7})\overrightarrow{V}t - \Phi_{g57}] \right\} (5)
 \end{aligned}$$

В розглянутому випадку перша та друга високочастотні доплерівські складові являються корисними сигналами, а третя і четверта, п'ята та шоста – перехресними завадами. При симетричному прийомі розсіяного випромінювання відносно площини пучків

$$K_{\text{пф}46} = K_{\text{пф}47} = K_{\text{пф}56} = K_{\text{пф}57} = 0, \text{ так як}$$



$$K_{\phi 46} = K_{\phi 47} = K_{\phi 56} = K_{\phi 57} = 0$$

внаслідок чого спостерігається придушення перехресних високочастотних перешкод і тому сигнал (5) можна записати

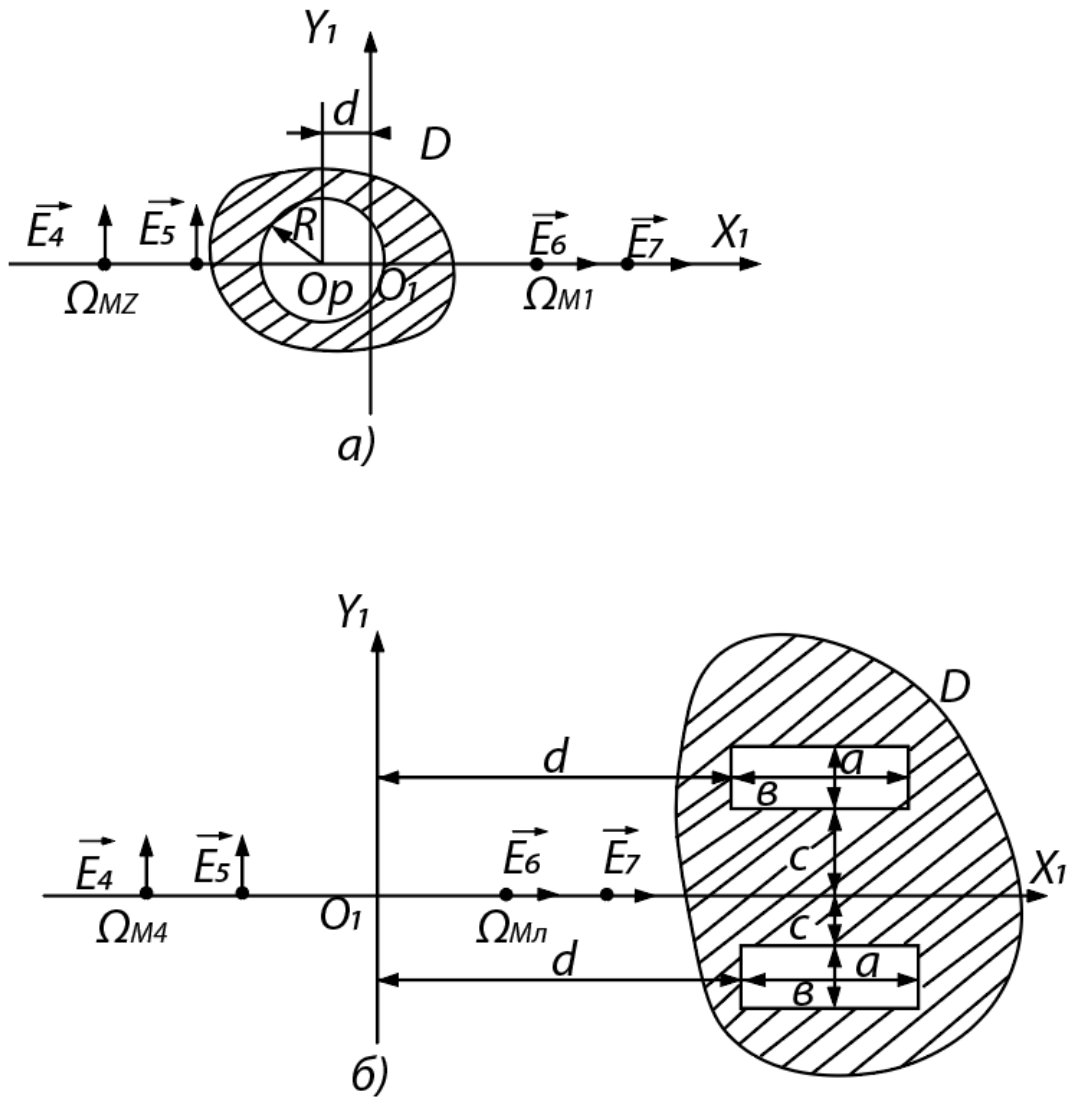


Рис.3.3. Діафрагма має мати два однакових отвори, які розташовані симетрично відносно площини пучків

$$\begin{aligned}
i(t) &= 2K_1 \left\{ \int_0^{\int} \int_0^{\pi} (I_{4i} + I_{5i} + I_{6i} + I_{7i}) r^z m_{\int} d_{\int} d\varepsilon + 2K_{\text{пф}45} \int_0^{\int} \int_0^{\pi} \sqrt{I_{4i} I_{5i}} r^z m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M2} \right. \\
&\quad \left. - \overrightarrow{K_{01}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}] \right. \\
&\quad \left. + 2K_{\text{пф}67} \int_0^{\int} \int_0^{\pi} \sqrt{I_{6i} I_{7i}} r^z m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M1} - \overrightarrow{K_{02}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g67}] \right\} \\
&= I_0 + I_{45} \cos[(\Omega_{M2} - \overrightarrow{K_{01}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}] + I_{67} \cos[(\Omega_{M1} - \overrightarrow{K_{02}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g67}] \quad (6)
\end{aligned}$$

Таким чином, вибираючи відповідним чином частотні зсуви пучків 4 і 6 можна забезпечити електричну фільтрацію двох корисних високочастотних сигналів для їх подальшого опрацювання з ціллю виміру двох ортогональних проекцій вектора швидкості  $V_x$  і  $V_z$ .

Також як і в попередніх розглянутих випадках, приймальна діафрагма в ЛДА може мати отвір довільної форми з віссю симетрії в площині  $O_1 X_1 Z_1$ . На попередніх рисунках представлені два можливих варіанти виконання приймальних діафрагм, забезпечуючи симетричний прийом відносно площини пучків.

Розглянуті багатокомпонентні схеми ЛДА з симетричним прийомом розсіяного випромінювання відносно площини пучків, що мають лінійні взаємно ортогональні поляризації, дозволяють забезпечити компенсацію перехресних завад незалежно від параметрів розсіювальних часток, тобто в тих схемах ЛДА можуть використовуватись як монодисперсні так і полідисперсні потоки розсіяних часток.

### **3.2. Симетричний прийом розсіяного випромінювання відносно площини $O_1 Y_1 Z_1$**

Якщо при вимірюванні швидкості двомірних потоків в якості розсіяних центрів використовують багатодисперсні сферичні частоти, або виникає необхідність зміни

швидкості часток заданого розміру, наприклад, двофазного полідисперсного потоку часток, то в тому випадку доцільно використовувати двокомпонентні схеми ЛДА з симетричним прийомом розсіяного випромінювання відносно площини  $O_1V_1Z_1$ .

Нехай в двокомпонентній схемі ЛДА з геометрією оптичної схеми представленої раніше використовується три зондуючих пучки 4,5 і 6 що мають різноманітні стани поляризації. Причому пучок 4 суміщений по частоті на величину  $\Omega_M$  і має лінійну поляризацію з азимутом  $\varphi_4$ , пучок 5 – має правоциркулярну поляризацію, а пучок 6 – лінійну поляризацію з азимутом  $-\varphi_4$ . Крім того пучки 4 і 6, пересікаються в зоні виміру, мають рівні інтенсивності. При проходженні часток через зону виміру розсіяне назад випромінювання збирається в межах отвору цифрами, вісь симетрії котрого розташована в площині  $O_1V_1Z_1$  і далі направляється на фотоприймач. В результаті оптичного суміщення трьох розсіяних пучків на виході фотоприймача формується електричний сигнал, котрий з урахуванням засобів симетрії просторової структури цілеспрямованого сигналу можна представити в наступному вигляді

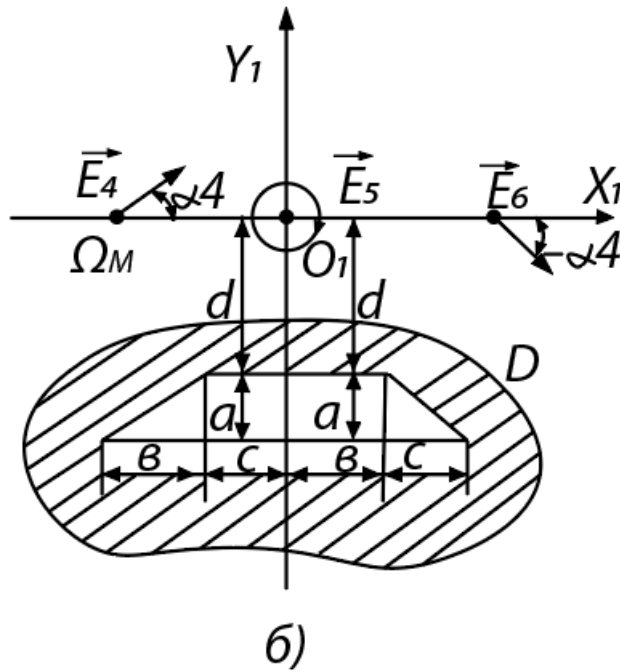
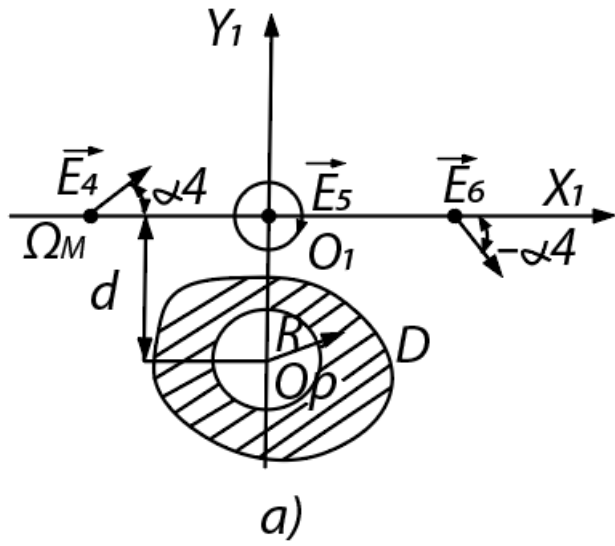


Рис.3.3. Вісь симетрії котра розташована в площині  $O_1Y_1Z_1$

$$\begin{aligned}
i(t) = K_1 \left\{ \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} (I_{4i} + I_{5i} + I_{6i}) r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon + 2K_{\text{пф}45} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i} I_{5i}} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_M \right. \\
- \overrightarrow{K_{01}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}] + 2K_{\text{пф}56} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{5i} I_{6i}} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos(\overrightarrow{K_{02}} \overrightarrow{V}t - \Phi_{g56}) \\
+ 2K_{\text{пф}46} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{(I_{41i} I_{42i} + 2\sqrt{K_{\text{пф}44i}^{12}} I_{42i} \cos \Phi_{g44i}^{12}) (I_{61i} + I_{62i} \\
- 2\sqrt{K_{\text{пф}66i}^{12}} I_{61i} I_{62i} \cos \Phi_{g66i}^{12})} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_M - \overrightarrow{K_{03}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g46}]} \left. \right\} \quad (7)
\end{aligned}$$

$$K_{\text{пф}46} = K_{\text{ф}46} K_{\text{пн}46}$$

$$K_{\text{пф}46} =$$

$$\begin{aligned}
= \frac{2|}{\int} \int_0^{\int} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sqrt{K_{\text{пф}46i}^{11}} I_{41i} I_{61i} \cos \Phi_{g46i}^{11} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon - \int_0^{\int} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{K_{\text{пф}46i}^{22}} I_{42i} I_{62i} \times \cos \Phi_{g46i}^{22} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon - \\
\int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{K_{\text{пф}46i}^{11}} I_{41i} I_{61i} e^{-j\Phi_{g46i}^{11}} - \sqrt{K_{\text{пф}46i}^{22}} I_{42i} I_{62i} e^{-j\Phi_{g46i}^{22}} - \\
\times \cos \Phi_{g46i}^{22} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon - \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{K_{\text{пф}46i}^{12}} I_{42i} I_{62i} \cos \Phi_{g46i}^{12} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon |}{\sqrt{K_{\text{пф}46i}^{12}} I_{41i} I_{61i} e^{-j\Phi_{g46i}^{12}} + \sqrt{K_{\text{пф}46i}^{21}} I_{42i} I_{61i} e^{-j\Phi_{g46i}^{21}} | r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon} \quad (8)
\end{aligned}$$

$K_{\text{пф}46}^{12}$  – коефіцієнт поляризаційного узгодження двох розсіяних хвиль, спостеріганих в «i» - ному напрямку при випромінюванні часток «x» і «y» компонентами електричного поля «к» - го зондуючого пучка,  $K_{\text{пф}46}^{11}$  – коефіцієнт поляризаційного узгодження двох розсіяних хвиль при випромінюванні часток «x» компонентами електричного поля відповідно четвертого і шостого зондуючих пучків;  $K_{\text{пф}46}^{22}$  – коефіцієнт поляризаційного узгодження двох розсіяних хвиль при випромінюванні частки «y» -

компонентами електричного поля четвертого і шостого зондуєчих пучків;  $K_{п46i}^{22}$  – коефіцієнт поляризаційного узгодження двох розсіяних хвиль при випромінюванні часток «х» і «у» - компонентами відповідно першого і другого зондуєчих пучків;  $K_{п46i}^{21}$  – коефіцієнт поляризаційного узгодження двох розсіяних пучків при випромінюванні часток «х» і «у» - компонентами відповідно першого і другого зондуєчих пучків;  $\Phi_{g44i}^{12}$ ,  $\Phi_{g66i}^{12}$ ,  $\Phi_{g46i}^{11}$ ,  $\Phi_{g46i}^{22}$ ,  $\Phi_{g46i}^{12}$ ,  $\Phi_{g46i}^{21}$  – складові фази відповідних елементарних доплерівських сигналів, які виникають при прийомі випромінювання в «i» -ому напрямку. Аналіз виразу показує, що вихідний сигнал фотоприймача має три високочастотні доплерівські сигнали, що мають різні частоти. Причому третій високочастотний сигнал на частоті  $(\Omega_M - \overrightarrow{K_{03}}\overrightarrow{V})$  являється перехресною похибкою, частотний спектр котрої може перекриватись з корисним сигналом, що ускладнює виділення корисного сигналу з похибок. Проте як слідує вираження, для заданого відносно розміру часток  $q_0$  в заданій кутовій апертурі  $\int$ , завжди можна забезпечити рівносильну нулю  $K_{ф46}$  і, відповідно, рівносильно нулю перехресної похибки, шляхом плавного і синхронно рівного нулю перехресної завади, шляхом плавного і синхронного вимірювання азимутів поляризації зондуєчих пучків 4 і 6 лінійно поляризаційні пучки 4 і 6 повинні мати в процесі настройки схеми завжди рівні по модулю але протилежні за знаком азимуту. В випадку симетричного прийому розсіяного випромінювання відносно площини  $O_1V_1Z_1$  і вибору азимутів поляризації пучків 4 і 6, що забезпечують взаємокомпенсацію перехресної завади, сигнал на виході фотоприймача можна представити

$$\begin{aligned}
 i(t) = K_1 & \left\{ \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} (I_{4i} + I_{5i} + I_{6i}) r^2 \sin^2 \delta \, d\delta \, d\varepsilon + 2K_{пф45} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i} I_{5i}} r^2 \sin^2 \delta \, d\delta \, d\varepsilon \cos[(\Omega_M \right. \\
 & \left. - \overrightarrow{K_{01}}\overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}] + 2K_{пф56} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{5i} I_{6i}} r^2 \sin^2 \delta \, d\delta \, d\varepsilon \cos(\overrightarrow{K_{02}}\overrightarrow{V}t - \Phi_{g56}) \right\} \\
 & = I_0 + I_{45} \cos[(\Omega_M - \overrightarrow{K_{01}}\overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}] + I_{56} \cos[(\overrightarrow{K_{02}}\overrightarrow{V})t - \Phi_{g56}] \quad (9)
 \end{aligned}$$

Таким чином вихідний сигнал фотоприймача містить два корисних доплерівських сигнали, частотні спектри котрих не перекриваються і тому їх можна використовувати для однозначного визначення двох ортогональних проекцій вектора швидкості  $V_x$  і  $V_z$ . Сигнал відповідає випадку прийому розсіяного випромінювання в межах отвору діафрагми довільної форми, що має вісь симетрії в площині  $O_1Y_1Z_1$ . В якості прикладу на (рис.3.4.) приведені два можливих варіанти виконання приймальної діафрагми. При заданому розмірі часток що розсіюються зміна форми отвору приймальної діафрагми визиває необхідність піднастройки і вибору певних азимутів поляризації пучків 4 і 6, при котрих спостерігається взаємокомпенсація перехресної завади.

Якщо в двокомпонентній схемі ЛДА використовується геометрія оптичної схеми, зонduючий пучок має наступні стани поляризації, пучок 4 – лінійну поляризацію з азимутом  $\int_4 = 45 + \int_0$ , пучок 5- правоциркулярну, а пучок 6 – лінійну поляризацію з азимутом  $\int_6 = 45 - \int_0$ , то при прийомі розсіяного випромінювання в межах круглого отвору діафрагми, вісь симетрії котрого лежить в площині, яка проходить через вісь схеми  $O_1Z_1$  і розташованої перпендикулярно площині пучків 4-6 вихідний сигнал фотоприймача опинаяється аналогічним вираженням (7), тобто так як і для схеми ЛДА з трьома зонduючими пучками в площині  $O_1X_1Z_1$ . При використанні в схемі ЛДА монодисперсних часток і здійсненні симетричного прийому розсіяного випромінювання відносно площини  $O_1Y_1Z_1$  в межах апертурної діафрагми з отвором довільної форми, можливо досягти взаємокомпенсації перехресної завади від пучків 4-6 при відповідному виборі складової азимута  $\int_0$  лінійно поляризаційних пучків 4 і 6 (8). В цьому випадку вихідний сигнал фотоприймача містить лише два корисних доплерівських сигнали, частотні спектри котрих не перекриваються і несуть інформацію про дві взаємно ортогональних проекції вектора швидкості.

Слід зазначити, що схеми ЛДА з трьома зонduючими пучками можуть бути також використані для виміру швидкості часток заданого розміру з оптичними властивостями рухомих, наприклад, в полідисперсному двофазному потоці. Для цього слід додатково

передбачити здійснення фіксування частотного зсуву пучка 6 на величину  $\Omega_{M2} \neq \Omega_M$ . Вибір стану поляризацій зондуєчих пучків 4 і 6 здійснюють також судячи з умови забезпечення придушення високочастотного сигналу на частоті  $\Omega_{M2} - \Omega_M \vec{K}_{03} \vec{V}$  для заданого розміру часток.

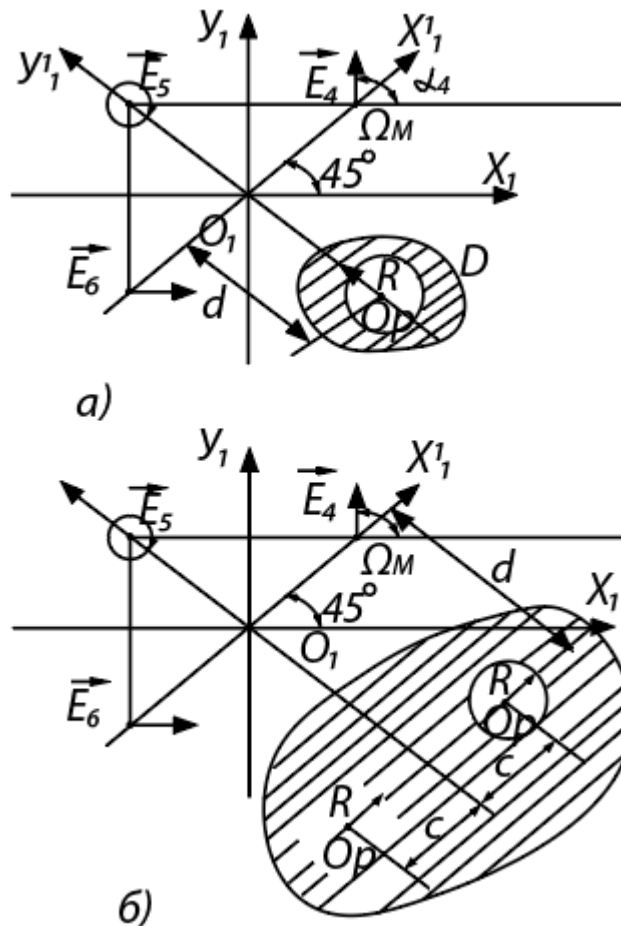


Рис.3.4. Два можливих варіанти виконання приймальної діафрагми

Таким чином в цьому випадку при проходженні через зону виміру часток, розмір котрої відрізняється від заданого розміру, на виході фотоприймача крім двох корисних доплерівських сигналів, які несуть інформацію про ортогональні проекції вектора швидкості, присутній також третій високочастотний сигнал. При відповідному виборі зсувів частот  $\Omega_{M2}$  і  $\Omega_M$  завжди можна забезпечити, щоб частотні спектри трьох високочастотних сигналів не перекривались. Таким чином три високочастотні сигнали можуть бути електрично відфільтровані і виділені з наступним використанням сигналу



на частоті  $\Omega_{M2} - \Omega_M - \overrightarrow{K_{03}}\vec{V}$  для розпізнавання частки заданого розміру і формування відповідного сигналу, який дозволяє обробку і вимір частоти двох інших доплерівських сигналів.

Розглянемо двокомпонентну схему ЛДА з чотирма зондуючими пучками 4,5,6 і 7, геометрія оптичної схеми котрої представлена на рисунках раніше. Чотири зондуючих пучки мають лінійні поляризації з різними азимутами: пучок 4 – азимут рівний  $\int_4$ , пучок 5 -  $\int_5$ , пучок 6 – азимут рівний  $-\int_5$ , пучок 7 -  $-\int_4$ . Причому пучок 4 суміщений за частотою на величину  $\Omega_{M2}$ , а пучок 6 – на величину  $-\Omega_{M1}$ , крім того пари пучків 4 і 7, а також 5 і 6 мають рівні інтенсивності хвиль в зоні виміру.

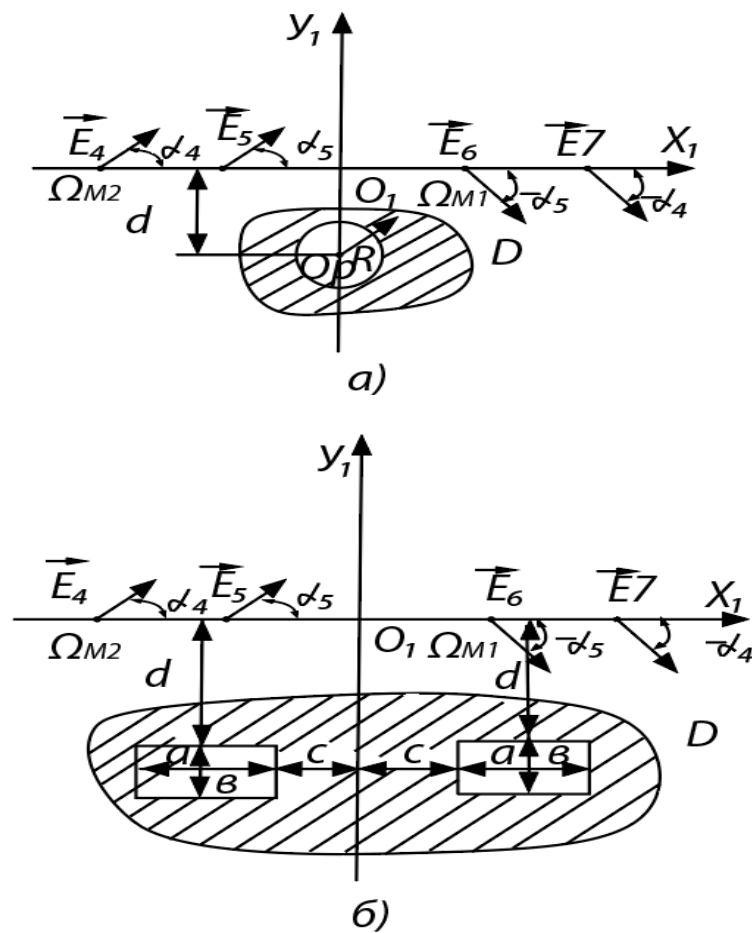


Рис.3.5. Двокомпонентна схема ЛДА з чотирма зондуючими пучками

При проходженні частки через зону вимірювання розсіяне назад випромінювання збирається в межах отвору діафрагми Д, що має вісь симетрії орієнтовану в площині  $O_1V_1Z_1$  і далі направляється на фотоприймач. В результаті оптичного суміщення чотирьох розсіяних пучків на виході фотоприймача формується сигнал, котрий з урахуванням властивостей симетрії просторової структури доплерівського сигналу можна записати в наступному вигляді

$$\begin{aligned}
i(t) = K_1 & \left\{ \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} (I_{4i} + I_{5i} + I_{6i} + I_{7i}) r^2 s m_{\int} d_{\int} d\varepsilon + 2K_{\text{пф}45} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{4i} I_{5i}} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M2} \right. \\
& \left. - \overrightarrow{K_{01}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g45}] \right. \\
& + 2K_{\text{пф}67} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{6i} I_{7i}} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M1} - \overrightarrow{K_{02}} \overrightarrow{V})t - \Phi_{g67}] \\
& + 2K_{\text{пф}47} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{41i} + I_{42i} + 2} \\
& \left. \sqrt{K_{\text{пф}44i}^{12} I_{41i} I_{42i} \cos \Phi_{g44i}^{12}} (I_{71i} + I_{72i} - 2 \sqrt{K_{\text{пф}77i}^{12} I_{71i} I_{72i} \cos \Phi_{g77i}^{12}}) \right. \\
& \left. r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \cos[(\Omega_{M2} - (\overrightarrow{K_4} - \overrightarrow{K_7}) \overrightarrow{V})t - \Phi_{g47}] + 2K_{\text{пф}56} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{(I_{51i} + I_{52i} + \right. \\
& \left. 2 \sqrt{K_{\text{пф}55i}^{12} I_{51i} I_{52i} \cos \Phi_{g55i}^{12}}) (I_{61i} + I_{62i} - 2 \sqrt{K_{\text{пф}66i}^{12} I_{61i} I_{62i} \cos \Phi_{g66i}^{12}}) r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \right. \\
& \left. \cos[(\Omega_{M1} - (\overrightarrow{K_6} - \overrightarrow{K_5}) \overrightarrow{V})t - \Phi_{g56}] + 2K_{\text{пф}46} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{41i} I_{6i}} r^2 m_{\int} d_{\int} d\varepsilon \right.
\end{aligned}$$

$$\cos[(\Omega_{M1} - \Omega_{M2} - (\vec{K}_6 - \vec{K}_4)\vec{V})t - \Phi_{g46}] + 2K_{\text{пф57}} \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{I_{5i}I_{7i}} r^2 m_{\text{д}} d_{\text{д}} d\varepsilon \cos[(\vec{K}_5 - \vec{K}_7)\vec{V}t - \Phi_{g57}] \quad (10)$$

$$K_{\text{пфке}} = K_{\text{фке}} K_{\text{пике}}$$

$$K_{\text{фке}} = 2 \left| \frac{\int_0^{\int} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{K_{\text{пке}}^{11} I_{\text{к1i}} I_{\text{е1i}}} \cos \Phi_{\text{гкеi}}^{11} r^2 m_{\text{д}} d_{\text{д}} d\varepsilon - \int_0^{\int} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{K_{\text{пкеi}}^{22} I_{\text{к2i}} I_{\text{е2i}}} \times}{\int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \left| \sqrt{K_{\text{пке}}^{11} I_{\text{к1i}} I_{\text{е1i}}} e^{-j\Phi_{\text{гкеi}}^{11}} - \sqrt{K_{\text{пкеi}}^{22} I_{\text{к2i}} I_{\text{е2i}}} e^{-j\Phi_{\text{гкеi}}^{11}} - \right.} \right. \\ \left. \times \cos \Phi_{\text{гкеi}}^{22} r^2 m_{\text{д}} d_{\text{д}} d\varepsilon - \int_0^{\int} \int_0^{2\pi} \sqrt{K_{\text{пкеi}}^{12} I_{\text{к1i}} I_{\text{е2i}}} \cos \Phi_{\text{гкеi}}^{12} r^2 m_{\text{д}} d_{\text{д}} d\varepsilon \right|} \\ \left. - \sqrt{K_{\text{пкеi}}^{12} I_{\text{к1i}} I_{\text{е2i}}} e^{-j\Phi_{\text{гкеi}}^{12}} + \sqrt{K_{\text{пкеi}}^{21} I_{\text{к2i}} I_{\text{е1i}}} e^{-j\Phi_{\text{гкеi}}^{21}} \right| r^2 m_{\text{д}} d_{\text{д}} d\varepsilon \quad (11)$$

Перша і друга високочастотні складові сигналу, які виникають оптичним суміщенням хвиль, розсіяних часткою відповідно від 4 і 5, а також 6 і 7 зондуючих пучків, являються корисними сигналами і можуть бути використовувані для отримання інформації про дві ортогональні проекції вектора швидкості. Третя, четверта, п'ята і шоста високочастотні складові – являються перехресними завадами. Придушення завад на частотах може бути використано при симетричному прийомі розсіяного випромінювання відносно площини в межах отвору діафрагми довільної форми.

Другий варіант реалізації схеми ЛДА представлений на (рис.3.6.). Зондуючі пучки мають наступні лінійні поляризації: пучок 5 – вертикальну, пучок 6 – горизонтальну поляризацію, пучок 4 – лінійну з азимутом  $\int_4$ , а пучок 7 – лінійну поляризацію з азимутом  $-\int_4$ . В даній схемі ЛДА використовуються симетричний прийом розсіяного випромінювання відносно двох площин.

При такому симетричному прийомі спостерігається компенсація перехресної завади від зондуючих пучків 5 і 6, так як діафрагма забезпечує симетричний прийом відносно площини пучків 5 і 6, по друге забезпечується компенсація перехресної завади від пучків 4 і 7, так як крім того діафрагма забезпечує симетричний прийом відносно площини  $O_1Y_1Z_1$  і при певних значеннях азимутів лінійно поляризованих пучків 4 і 7 для заданого розміру часток.

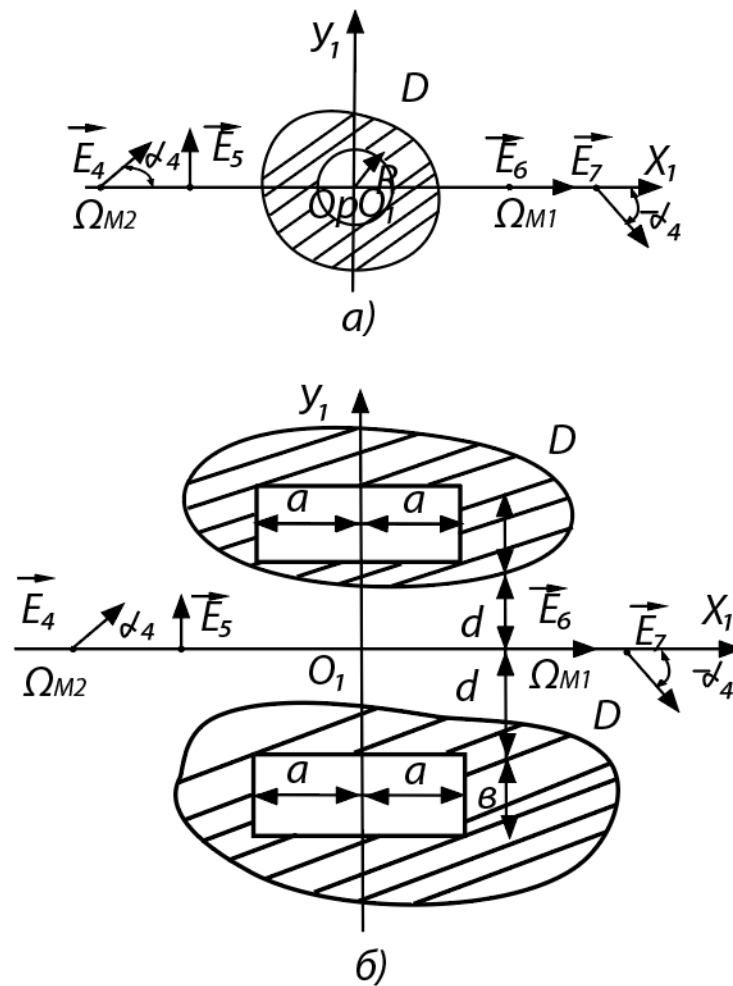


Рис.3.6. Схема ЛДА з чотирма зондуючими пучками

Отже, ця схема ЛДА з чотирма зондуючими пучками, також як і схеми ЛДА з трьома зондуючими пучками, дозволяють при відповідному зсуві частот зондуючих

пучків в електричній фільтрації перехресної завади або від пучків 4 і 7, або від пучків 5 і 6 реалізувати схему зміни швидкості часток заданого розміру, що рухаються, наприклад, в полідисперсному двофазному потоці.

### **3.3. Безконтактні виміри в авіаційній галузі**

Випробування конструкцій – складова частина процесу проектування та виробництва аерокосмічної техніки.

Це основа покращення характеристик, якості, безпеки та надійності кінцевого виробу.

Вимоги ринку до нової, ще більш ефективної аерокосмічної продукції збільшує кількість варіантів конструкцій, що відпрацьовуються, і ускладнює їх випробування. Фахівцям з проектування та доведення необхідно проводити більш ефективні модальні випробування для підвищення продуктивності та підтримки точності та кореляції з кінцево-елементними моделями (наприклад, при аналізі діючих навантажень, акустичного випромінювання тощо). Також для цих нових конструкцій необхідно вивчення характеристик у багатьох просторових точках.

Поєднання великої кількості об'єктів та точок вимірювань швидко збільшує вартість модальних випробувань, що виконуються традиційними способами, враховуючи великі обсяги робіт з підготовки та препарування конструкції акселерометрами та багатоканальними системами реєстрації даних.

Конкурентні переваги виробників цивільної авіаційної техніки зосереджені у двох галузях: паливній економічності та підвищенні комфорту пасажирів. У зв'язку з цим, авіаційні інженери ще більше зацікавлені у вимірах шуму, ніж їхні попередники.

У Технологічному інституті ВПС (AFIT) скануючий віброметр Polytec PSV-400-3D застосовується для дослідження вібраційних характеристик безпілотних літальних

апаратів (UAV) та інших складних аерокосмічних та транспортних конструкцій. Він дозволив покращити результати кінцево-елементного аналізу флаттера та значно скоротити час випробувань та обробки результатів.

Екологічні вимоги та збільшення тяги виводять проектування двигунів на новий рівень.

Правильне розуміння явища вібраційної довговічності – одне з важливих завдань, яке успішно може бути вирішене з використанням лазерної віброметрії.

Лазерна віброметрія – сучасний якісно новий рівень вимірювання параметрів механічних коливань об'єктів. Унікальні фізичні особливості лазерних методів визначають багато їхніх переваг. Це можливість дистанційного безконтактного виміру вібрації та відсутність впливу на резонансні властивості об'єктів, у тому числі мікроскопічних розмірів; можливість вимірювань без попередньої підготовки поверхні об'єкта та оперативний вимір вібрацій у різних точках об'єкта у небезпечній для персоналу зоні (хімічно агресивній, з високою температурою, радіацією тощо). Своє місце лазерні віброметри знаходять у різних галузях науки, промисловості, а також у медичних застосуваннях. Ось деякі приклади використання лазерних доплерівських віброметрів (ЛДВ):

- авіакосмічне - ЛДВ у цьому випадку є інструментами діагностики компонентів літального апарату, що не викликає руйнувань;
- акустичне – ЛДВ – стандартні інструменти акустичної системи, які також допомагають діагностувати та налаштовувати музичні інструменти;
- автомеханічне - ЛДВ активно використовуються в багатьох автомеханічних додатках таких, як динаміка конструкцій, діагностика руйнувань, визначення величин шуму, вібрації та хвилястості;
- біологічне - ЛДВ використовуються для діагностики слухового апарату в медицині, а також для дослідження комунікації між комахами;

- калібрування - З тих пір як ЛДВ вимірюють зміщення, що калібруються до довжини хвилі світла, вони часто використовуються для калібрування інших типів перетворювачів;
- діагностика жорсткого диска - ЛДВ широко застосовуються для діагностики жорстких дисків переважно для позиціонування головки;
- детектування наявності мін - ЛДВ показали перспективні результати у сфері визначення положення захованих мін. Методика використовує аудіо джерело таке, як акустичну систему, щоб схвилювати землю і змусити її коливатися в дуже малих межах. Потім ЛДВ вимірює ці коливання землі і області поверхні над захованою міною показують підвищений рівень вібршвидкості на резонансній частоті порожньої породи.

Лазерний віброметр призначений насамперед для дистанційного виміру вібршвидкості досліджуваного об'єкта або його частини в межах від 0,01 до 50 мм/с на вібрчастотах від 80 Гц до 11 кГц з можливістю розширення діапазону вібрчастот у бік низьких частот до 10 Гц. Вимірювальна дистанція від лазерного віброметра до випробуваного об'єкта становить від 15 до 10 м і більше. Напруга живлення віброметра – 12 В постійного струму від переносної акумуляторної батареї або джерела живлення, що підключається до мережі змінного струму 220 В (50 Гц). Потужність – 15–20 Вт (залежно від режиму роботи).

Принцип роботи лазерного віброметра заснований на доплерівському зрушенні частоти оптичного (лазерного) випромінювання, відбитого від об'єкта, що рухається. У цьому випадку застосовують метод оптичного гетеродинування відбитого від об'єкта слабкого оптичного сигналу на основі двопроменевої інтерференційної оптичної схеми з подальшим формуванням квадратурних компонентів електричного сигналу фотодетекторами балансного типу. Мікропроцесори, що входять до складу лазерного віброметра, виробляють цифрову обробку та аналіз вібраційних сигналів. Результати у вигляді спектрограм або осцилограм відображаються на екрані зовнішнього комп'ютера,

підключеного через RS-232 або USB, роз'єми яких розміщені на панелі керування приладу. Вимірювання параметрів сигналу проводиться за допомогою рухомого маркера на екрані дисплея.

Наземні вібровипробування - необхідна вимога для нових літаків та аерокосмічних конструкцій. Отримані дані можуть бути використані для модального аналізу та кореляції з кінцево-елементною моделлю, аналізу навантажень з метою запобігання руйнації та перевірки відсутності флаттера.

До складу портативного лазерного віброметра входить персональний кишеньковий комп'ютер. Він у графічному вигляді відображає результати вимірів на дисплеї; управління режимами роботи лазерного віброметра через віртуальну панель управління, у тому числі режимами обробки сигналу та відображення його в часовій (осцилограф) або частотній (аналізатор спектру) областях; вибирає межі амплітудних вимірювань та тривалості розгортки в режимі осцилографа, а також частотну смугу огляду в режимі аналізатора спектра та число усереднень реалізацій спектрів від 1 до 256; виконує функцію встановлення лінійного або логарифмічного масштабів у режимі аналізатора спектра та в режимі запису результатів вимірювань на флеш-карту у форматі, вибраному оператором та з можливістю подальшого відтворення на іншому комп'ютері. Розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє керувати всіма перерахованими функціями та режимами за допомогою стандартних комп'ютерів по каналах RS-232 або USB, що дає змогу включати лазерний віброметр до автоматизованих вимірювальних систем. До складу лазерного віброметра входять оптична система, що формує квадратурні складові доплерівського сигналу, та електронна система.

При вібраційному аналізі деталей та вузлів літака описується динаміка конструкції, визначаються власні частоти та повна модальна модель. Наприклад, шасі літака – критичний вузол, який має відповідати найвищим стандартам якості.



Розшарування та розтріскування – основні дефекти, що значно знижують експлуатаційні властивості аерокосмічної продукції. Для пошуку локалізованих дефектів як методи неруйнівного контролю успішно застосовуються нелінійна лазерна віброметрія) та хвилі Лемба.

Скануюча лазерна віброметрія дає можливість швидких, безконтактних (без додаткового навантаження об'єкта) вимірювань вібрації всієї поверхні з високою просторовою та частотною роздільною здатністю. Використовуючи скануючі віброметри Polytec, авіаційні інженери-розробники та вчені можуть значно скоротити час та обсяги вібраційних випробувань. Віброметри Polytec – золотий стандарт у галузі аерокосмічних розробок, управління якістю та моніторингу технічного стану.

Скануючі віброметри PSV-400 та PSV-400-3D надають передову технологію вимірювання для аналізу та візуалізації вібрації конструкції з частотами до 20 МГц. Будь-які поверхні можуть бути швидко скановані та автоматично досліджені на гнучкій інтерактивно створюваній сітці без зміни маси та жорсткості об'єкта з мінімальними витратами часу.

В основі кожної системи Polytec – лазерний доплерівський віброметр – прецизійний лазерний одноточковий перетворювач, що використовується для визначення віброшвидкості та вібропереміщення в точці шляхом вимірювання частотного зсуву променя, відбитого від поверхні, що рухається.

Традиційні способи виміру вібрації в декількох точках, при яких на об'єкт випробування кріпляться контактні датчики, ускладнюють аналіз мод і форм коливань і вимагають багато часу. У разі використання двокоординатних сканерів позиціонування лазерного променя може бути автоматизовано. Це дуже спрощує побудову форм коливань, модальний аналіз та вимір АЧХ. Тепер геометричні властивості об'єкта та розташування точок вимірювання можуть бути запрограмовані, полегшуючи процес вимірювання та підвищуючи точність. Для дослідження форм коливань просто визначте геометрію, сітку сканування та почніть вимір. Після завершення автоматичного

сканування відобразить анімовані форми коливань зручним способом у 2D- або 3D-виді. Такий спосіб відображення – надзвичайно ефективний інструмент розуміння особливостей вібрації конструкції.

Розвиток лазерної діагностики дозволяє виявляти більшість проблем на етапі конструювання, що, здебільшого заощаджує час та великі кошти. В майбутньому ці методи будуть використовуватись набагато частіше, а це в свою чергу дасть можливість проектувати авіаційну техніку з більшою точністю та безпекою, що є одними з найважливіших факторів в експлуатації.

## ВИСНОВКИ

Отже, експлуатаційна діагностика займається вирішенням широкого кола завдань, пов'язаних із визначенням стану авіаційної техніки. Сьогодні проблема підвищення ефективності входить до найбільш актуальних проблем технічної експлуатації, так як на частку робіт, пов'язаних з перевіркою працездатності та пошуком несправностей, припадає більше половини трудомісткості технічного обслуговування і близько 90% часу простою літального апарату при усуненні несправностей.

Отримання діагностичної інформації у процесі експлуатації ЛА здійснюється шляхом комплексного використання бортових (вбудованих) та наземних (зовнішніх) засобів контролю, що утворюють єдину систему. Характерною особливістю системи є комплексне використання діагностичної інформації, яка отримується на всіх етапах експлуатації ЛА (у польоті, при технічному обслуговуванні, ремонті), у масштабі авіаційної галузі.

Оптичні безконтактні методи дозволяють вирішити проблеми виробництва, пов'язані з недостатньою точністю, великою кількістю браку, знос вимірювального обладнання. При використанні даного методу вимірювання не виникають додаткові похибки, пов'язані, наприклад, з прослизанням.

Лазерні доплерівські анемометри упродовж майже трьох десятиліть використовуються для дослідження однофазних потоків. Для вимірювання кінематичних характеристик течії суцільного середовища в неї вводять частинки-трасери мікрометрових розмірів, масова і об'ємна концентрація яких мізерна мала.

При дотриманні певних умов миттєві швидкості частинок-трасерів будуть практично рівними відповідним швидкостям несучої їх суцільного середовища. Гетерогенні потоки, у яких частинки присутні природним чином, також досліджуються з використанням ЛДА. Можна з упевненістю зробити висновок, що на сьогодні ЛДА

став ефективним і найчастіше єдиним засобом локальної діагностики подібних потоків: присутність частинок у потоці в принципі виключає використання такого поширеного засобу вимірювань однофазних течій як термоанемометр.

Метод лазерної доплерівської анемометрії відноситься до оптичних методів діагностики, головною перевагою яких є можливість проведення вимірювань без обурення течії в області, що досліджується. Наряду з цим загальною перевагою метод ЛДА має і своїми унікальними особливостями. До них відносяться:

- 1) високий просторовий дозвіл завдяки малій величині вимірювального обсягу;
- 2) високий тимчасовий дозвіл внаслідок комбінації малого за величиною вимірювального обсягу із швидкодіючим процесором доплерівського сигналу (це дозволяє проводити вимірювання миттєвих значень швидкості);
- 3) відсутність необхідності тарування завдяки абсолютній лінійності між частотою доплерівського сигналу та величиною швидкості;
- 4) можливість проведення вимірів однієї, двох та трьох компонентів вектора швидкості;
- 5) чітке визначення напрямку вимірів, так як вимірювана величина є проекцією вектора швидкості на напрямок, що визначається оптичною системою;
- 6) можливість дослідження потоків з реверсивною швидкістю, а також проведення вимірювань за швидкості, близької до нуля, внаслідок організації оптико-електронного зсуву частоти;
- 7) висока стійкість і повторюваність результатів вимірювань завдяки стабільності та лінійності оптичних електромагнітних хвиль.

Тому, нове покоління доплерівських анемометрів, засноване на застосуванні одночастотних твердотільних лазерів спільно з волоконно-оптичними елементами, істотно розширює сферу їх застосування. Лазерні доплерівські анемометри у

найближчому майбутньому замінять трубки Піто, які використовувалися до сьогоднішнього часу для вимірювання швидкості газових потоків в аеродинамічних трубах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дубніцев О. Н., Тинкевичюс Б.С. методи лазерної доплериметричної анемометрії. М.: Наука, 1982. -304 с.
2. Лаверна анемометрія, дистанційна спектрокодія та інтерферометрія / Под ред. чл. кор. АН УРСР М.С.Соскіна. Київ: Наук.думка, [1985. – 759 с.
3. Землянський В.І. Ізерування швидкості потоків лазерним доплерівським методом /Гарахунок параметрів доплерівського сигналу ЛДА про врахування поляризаційно-фазових ефектів розсіювання. Київ: Вища школа [1987.-177 с.
4. Durst F., Melling A., Whitelaw J.H. Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry. N.-Y.: Academic Press, 1976.
5. Ринкевичюс В.С. Лазерная анемометрия. М.: Энергия, 1978. 159 с.
6. Buchhave P., George W.K. The Measurement of Turbulence with the Laser-Doppler Anemometer // Ann. Rev. Fluid Mech. 1979. V. 11. P. 443.
7. Дюррани Т., Грейтид К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях / Под ред. Божкова А.И. М.: Энергия, 1980. 5. Sommerscales E.F.C. Laser Doppler Velocimeter. In: Methods of Experimental Physics. V. 18 / Ed. Emrich R.J. London: Acad. Press, 1981. P. 93. 6. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс В.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 303 с.
8. Смирнов В.И. Лазерная диагностика турбулентности. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: МЭИ, 1997.40 с.
9. Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. Новосибирск: Наука, 1980. 160 с.
10. Crowe C, Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. Boca Raton. Florida. USA. CRC Press. 1998.472 p.
11. И. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. М.: Физматлит, 2003. 192 с.

12. Головин В.А., Коняева Н.П., Ринкевичюс Б.С., Янина Г.М. Исследование модели двухфазного потока с помощью ОКГ//ТВТ. 1971. Т. 9. № 3. С. 606.
13. Ринкевичюс В.С., Янина Г.М. Влияние размера частиц на величину доплеровского сигнала в оптическом доплеровском измерителе скорости // Радиотехника и электроника. 1973. Т. 18. № 7. С. 1353.
14. Farmer W.M. Observation of Large Particles with a Laser Interferometer//AppUed Optics. 1974. V. 13. P. 610.
15. Durst F., Zare M. Laser-Doppler Measurements in TwoPhase Flows. Proc. of the LDA-Symposium. University of Denmark. 1975.
16. Roberts D.W. Particle Sizing Using Laser Interferometry // Applied Optics. 1977. V. 16. P. 1861.
17. Farmer W.M. Measurement of Particle Size, Number Density and Velocity Using a Laser Interferometer // Applied Optics. 1972. V. 11. P. 2603.