

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

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____Ю.В. Грищенко
«__»_____2022 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Авіаційний лазерний вимірювач вібрацій»

Виконавець: _____ Соляник Родіон Олександрович _____

(прізвище та ініціали)

(підпис, дата)

Керівник: _____ проф., Землянський Володимир Михайлович

(прізвище та ініціали)

(підпис, дата)

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

(прізвище та ініціали)

(підпис, дата)

(прізвище та ініціали)

(підпис, дата)

Нормоконтролер: _____ Левківський В.В. _____

(прізвище та ініціали)

(підпис, дата)

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Спеціальність 173 «Авіоніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Грищенко Ю.В.

(підпис)

(П.І.Б.)

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Соляника Родіона Олександровича

1. Тема дипломної роботи: «Авіаційний лазерний вимірювач вібрацій» затверджена наказом ректора від «__» 2022 р. № /ст__
2. Термін виконання роботи:.
3. Вихідні дані до роботи: дані про геометрикооптичне та хвильове представлення лазерного пучка, просторові параметри та характеристики лазерного випромінювання, принцип вимірювання вібрації електромеханічними віброметрами, електрооптичні перетворювачі одночастотного когерентного випромінювання в двох частотні, контроль нерівномірності швидкості руху одночастотними лазерними системами з частотною модуляцією.

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Загальні відомості про лазери та порівняння їх з електромеханічними пристроями вимірювання вібрацій; Розділ 2. Використання ЛВС з частотною модуляцією для безконтактного контролю вібрацій; Розділ 3. Лазерні багатохвильові вимірювачі вібрацій; Розділ 4: Охорона праці; Розділ 5: Лазерна безпека.

5. Перелік обов'язкового графічного матеріалу: конструкція датчику вібрацій, електронний перетворювач частоти вимірювання, тридзеркальна лазерна система контролю нерівномірності швидкості руху, лазерна система вимірювання кутових коливань зі сканувальним пристроєм, схема обробки вихідного сигналу фотоприймача, лазерна система з роздільними каналами вимірювання лінійних та кутових прискорень.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підбір літератури		
2	Написання розділу №1		
3	Написання розділу №2		
4	Написання розділу №3		
5	Написання розділу з охорони праці		
6	Написання розділу з лазерної безпеки		
7	Формування і написання висновків		
8	Оформлення роботи, подання на кафедру та усунення недоліків		

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці			
Охорона навколишнього			

8. Дата видачі завдання: “ _____ ” _____ 2022 р.

Керівник дипломної роботи (проекту) _____ Землянський В.М.

(підпис керівника)

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Соляник Р.О.

(підпис випускника)

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Авіаційний лазерний вимірювач вібрацій» складає: 118 сторінок та містить 27 рисунків, 1 таблиці і 13 використаних джерел.

Об'єкт дослідження: лазерний вимірювач вібрацій.

Предмет дослідження: параметри та характеристики лазерного вимірювача вібрацій.

Мета дослідження: розробка та приведення прикладу авіаційного лазерного вимірювача вібрацій.

Методи дослідження: дослідження складних систем, методи ефективності роботи технічних засобів здійснення та визначення показників авіаційних вібрацій, порівняння.

Розглянуто вже існуючі методи вимірювання вібрацій та більш докладно теоретичні засади лазерної віброметрії, можливості і особливості побудови лазерних віброметрів.

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛАЗЕРИ ТА ПОРІВНЯННЯ ЇХ З ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ ПРИСТРОЯМИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЙ

- 1.1. Основні поняття
- 1.2. Геометрикооптичне та хвильове представлення лазерного пучка
- 1.3. Просторові параметри та характеристики лазерного випромінювання
- 1.4. Принципи вимірювання вібрацій електромеханічними віброметрами

РОЗДІЛ 2. ВИКОРИСТАННЯ ЛВС З ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЙ

- 2.1. Електрооптичні перетворювачі одночастотного когерентного випромінювання в двочастотні
- 2.2. Контроль нерівномірності швидкості руху одно частотними лазерними системами з частотною модуляцією
- 2.3. Вимірювання параметрів кутових коливань ЛВС за допомогою скануючи пристроїв
- 2.4. ЛВС з частотною модуляцією одночасного контролю параметрів лінійних та кутових механічних коливань

РОЗДІЛ 3. ЛАЗЕРНІ БАГАТОХВИЛЬОВІ ВИМІРЮВАЧІ ВІБРАЦІЙ

- 3.1. Загальні відомості та принцип роботи
- 3.2. Контроль нерівномірності швидкості руху трикомпонентною лазерною системою
- 3.3. Аналіз похибок вимірювання амплітуд гармонічних коливань з каналом зі здвигом частоти з вузько смуговою фільтрацією
- 3.4. Аналіз похибки вимірювання амплітуд гармонічних коливань з одночастотним каналом з вузькосмуговою фільтрацією

- 3.5. Аналіз похибки вимірювання параметрів механічних коливань складної форми каналом зі здвигом частоти
- 3.6. Особливості метрологічної атестації

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

- 4.1. Основні положення
- 4.2. небезпечні та шкідливі виробничо-професійні фактори
- 4.3. Гігієнічна класифікація лазерів, умов та характеру праці
- 4.4. Загальні вимоги до проектування, розробки, пристрої та експлуатації лазерних технологічних установок
- 4.5. Загальні вимоги до лазерних виробничих приміщень, розміщення обладнання, організації робочих місць

РОЗДІЛ 5. ЛАЗЕРНА БЕЗПЕКА

- 5.1. Максимально допустима взаємодія
- 5.2. Нормативи
- 5.3. Класифікація
- 5.4. Загальні запобіжні заходи
- 5.5. Екологічність

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

АТ – авіаційна техніка

ВВП – вібровимірювальний перетворювач

ЕРС – електрорушійна сила

ЛДА – лазерна доплерівська анемометрія

ЛА – літальний апарат

ЛВС – лазерна вимірювальна система

ЛДВ – лазерна доплерівська віброметрія

СКВ – середнє квадратичне відхилення

ЧМ – частотна модуляція

ВСТУП

З середини 60-х років минулого століття лазерні технології почали ставати невід'ємною частиною наукових і технологічних процесів, поступово знаходячи нові сфери застосування. Ефект Доплера, що використовується в декодерах лазерного випромінювання, спочатку застосовувався для вимірювання швидкості потоку рідин, а потім область його застосування значно розширилася, аж до вимірювання вібрації деталей та виробів під час їх експлуатації та випробувань у лабораторних умовах на вібраційному устаткуванні а особливо в авіації. Так виникла лазерна (доплерівська) віброметрія. Ефект Доплера полягає в тому, що світло (хвильове випромінювання), відбите від об'єкта, що рухається, змінює свою частоту пропорційно швидкості об'єкта. Враховуючи, що лазерний промінь є монохроматичним випромінюванням (на одній певній або на декількох певних довжинах хвиль), ми можемо дуже точно виміряти доплерівську зміну його частоти при відображенні від об'єкта, що коливається, і тим самим дуже точно виміряти швидкість такого об'єкта. Більше того, доплерівське зміщення практично лінійно залежить від швидкості об'єкта, що освітлюється (опромінюваного).

Особливий інтерес представляє вимірювання доплерівського зміщення у віброметрії, що дозволяє проводити вимірювання у будь-якій видимій точці без додавання масового (інерційного) навантаження, адже наклеєний на виріб датчик-акселерометр додає масу та змінює вібраційні характеристики об'єкта. Крім того, не завжди і не скрізь можна встановити акселерометр, особливо на гарячих або легких місцях. Тому лазерна віброметрія відрізняється від традиційної величезними діапазонами вимірів, високою точністю та достовірністю. Ще одна перевага лазерної віброметрії пов'язана з простотою реалізації вимірювання в багатьох точках об'єкта за рахунок перенаправлення (розгорнення) променя лазера. Тому лазерний віброметр, що сканує, дозволяє побудувати безконтактним методом повну віброграму виробу при реальному навантаженні під час експлуатації або в лабораторії для виявлення слабких

або резонуючих місць у конструкції, щоб поліпшити вібраційні та акустичні характеристики випробуваного виробу.

Сучасною тенденцією розвитку випробувальних технологій та вдосконалення самих вібростендів стало багатоосьове навантаження. Ми з вами живемо в ортогональному тривимірному світі, тому багатовікове вібраційне навантаження краще відображає реальні вібраційні навантаження в нашому світі. Використовується безліч варіантів навантаження об'єкта декількома вібраційними стендами, найпростішим з яких залишається конфігурація MESA (від multi exciter / single axis – кілька навантажень по одній осі), коли два або більше вібростендів створюють навантаження в одному напрямку однієї осі.

Але наближена до умов реального світу – триосьова конфігурація MEMA (від multi exciter / multi axis – кілька навантажень по кількох осях). Вона передбачає лінійне переміщення, створюване вібростендами під прямими кутами друг до друга. У деяких випадках лінійні навантаження MEMA доповнюють трьома напрямками обертання ще по трьох осях (крен, тангаж і нишпорення), щоб отримати шість ступенів свободи по шести осях (три осі лінійного переміщення і три осі обертання). Таке навантаження називається багатоосьовим і зазвичай відтворюється на найскладнішому сервогідролічному устаткуванні. Однак у більшості випадків досить площинного двоосьового вібраційного навантаження або ортогонального триосьового навантаження, щоб виявити резонанс, що посилює коливання, на певній частоті (частотах) або передбачити скорочення терміну служби за рахунок підвищеного зносу від деформацій при широкосмугових випадкових коливаннях (вібрація випробування порівняно з поперемінним одноосьовим).

Вібрації, що виникають при роботі двигуна і приладів літака, істотно впливають на технічний стан обладнання літака, двигуна і літака в цілому. Під час вібрації збільшується навантаження на опори, деталі та вузли, а також кріплення літака, що

призводить до збільшення їх зносу, зниження міцності та надійності, зниження ресурсу обладнання та двигунів, руйнування конструктивних елементів двигуна або літака.

Лазерний віброметр, його висока точність у визначенні фізичних величин, що характеризують різні коливальні процеси, в даному випадку поєднується з високою інформативністю і можливістю дистанційних і автоматизованих вимірювань.

Лідерами у цих двох напрямках (лазерна віброметрія та вібростенди багатоосьового навантаження) можна вважати німецьку компанію OptoMET та японську Shinken. Японське підприємство засноване у січні 1975 року і з того часу займається багатоосьовим енергозберігаючим обладнанням для електродинамічного вібраційного тестування, причому патент на багатоосьовий шейкер було отримано ще 1988 року. Німецька OptoMET із Дармштадта більше націлена на лазерну віброметрію та застосування цифрових методів обробки сигналів за рахунок використання в одному приладі цифрової обробки сигналів UltraDSP разом із високочутливим аналоговим виміром. Компанія OptoMET однією з перших випустила лазерні віброметри SWIR (Short Wavelength Infrared – короткохвильові інфрачервоні).

Для забезпечення безпеки польотів, виявлення помилок на ранніх стадіях їх виникнення, своєчасного вжиття заходів щодо попередження поломок обладнання та польотних подій необхідно знати причини виникнення тих чи інших помилок для їх усунення.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛАЗЕРИ ТА ПОРІВНЯННЯ ЇХ З ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ ПРИСТРОЯМИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЇ

1.1. Основні поняття

Закони індукованого випромінювання, які лежать в основі роботи лазерів, були сформульовані ще 1917 р. А.Ейнштейном. Лазер (оптичний квантовий генератор) – унікальне джерело випромінювання, яке включає в себе вдале поєднання високої монохроматичності, малого кутового розходження, когерентності та великої спектральної щільності енергії випромінювання. Завдяки цим якостям лазер здатен забезпечити безконтактність та дистанційність вимірювань, збільшити роздільну здатність існуючих методів вимірювань, збільшити їх продуктивність і точність, наблизивши точність робочих приладів до точності зразкових.

В теперішній час найбільш перспективними являються методи вимірювань, які реалізуються за допомогою ЛВС (лазерні вібраційні системи) з частотною модуляцією, та мають наступні переваги :

- дозволяють отримувати більш високе співвідношення сигнал-шум;
- забезпечують частотне та просторове придушення фону зовнішньої засвітки без застосування оптичних фільтрів;
- дозволяють вимірювати параметри механічних коливань важкої форми на значному віддаленні від об'єкта вимірювання;
- володіють високим захистом від перешкод;
- дозволяють здійснювати аналіз вихідного сигналу фотоприймача в частотному діапазоні вище області низькочастотних шумів фотоприймача та лазера.

Лазерні вимірювальні системи з частотною модуляцією називають прилади, принцип дії яких заснований на ефекті Доплера, використанні лазерів, та маючі на

<i>Кафедра авіоніки</i>							
<i>Виконав</i>	Соляник Р.О.			Авіаційний лазерний вимірювач вібрацій	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	Землянський В..					2	
<i>Консульт.</i>					173 «Авіоніка»		
<i>Н-контр.</i>	Левківський В.В.						
<i>Зав. каф.</i>	Грищенко Ю.В.						

виході частотно-модульований сигнал несучої частоти, яка промодульована частотою Доплера.

В ЛВС також використовують явище інтерференції, тому їх іноді також називають лазерними інтерферометрами.

Лазер являється генератором оптичного когерентного випромінювання, який характеризується високою направленістю та великою щільністю енергії. Поняття «когерентність» відповідає поняттю «кореляція», оскільки під когерентністю в оптиці розуміють кореляцію будь-яких характеристик поля електромагнітної хвилі (наприклад, фаза хвилі).

Внесемо деякі значення та поняття.

λ – довжина хвилі. Це відстань, на яку поширюється поверхня хвилі за час періоду T . Довжини хвиль випромінювання для видимої області спектра лежать в межах від 0.4 мкм (фіолетовий край) до 0.7 мкм (червоний край). Довжина хвилі випромінювання відрізняється в залежності від середовища, а період T однаковий в будь-якому середовищі.

Показник переломлення середовища – це відношення швидкості світла у вакуумі до швидкості світла в даному середовищі. Він залежить від довжини хвилі та росте зі збільшенням λ .

Інтенсивність коливань W - це величину, яка дорівнює квадрату амплітуди. Енергія коливань за проміжок часу, за перебігу якої амплітуду можна вважати постійною, пропорційна інтенсивності.

Під поляризацією розуміють орієнтацію вектора електричного поля. Якщо направлення вектора E постійне, хвилю називають лінійно поляризованою.

Отже, якщо амплітуда, частота, фаза, направленість розповсюдження та поляризація електромагнітної хвилі постійні або змінюються, але впорядковано, по деякому закону, то така хвиля когерентна. Поняття повної когерентності являється теоретичним, оскільки в дійсності плоских монохроматичних хвиль не існує, і тому вводиться поняття часової та просторової когерентності.

Тепер розглянемо поняття часової когерентності. Для цього будемо вважати, що електромагнітне випромінювання частотою ν_0 відбувається за час t – таке випромінювання називають хвильовим цугом (рис. 1.1).

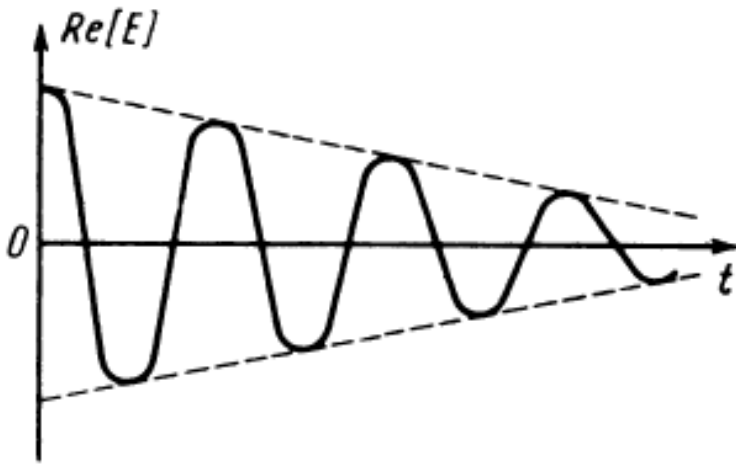


Рис. 1.1. Хвильовий цуг

Амплітуда хвилі при цьому буде розраховуватися по формулі :

$$E(t) = \left\{ \begin{array}{l} E_0 \exp \left\{ -j2\pi\nu_0 t - t/\tau \right\}, \quad t \geq 0; \\ \\ \\ E_0 \exp \left\{ j2\pi\nu_0 t - t/\tau \right\}, \quad t < 0. \end{array} \right\},$$

Якщо хвильовий цуг випромінюється з точки А в точку С (рис. 1.2), то коли дві частини цугу пройдуть різні шляхи, вони зустрінуться в точці С. Різниця шляхів АВС – ADC називають оптичною різницею ходу двох променів (δ_0).

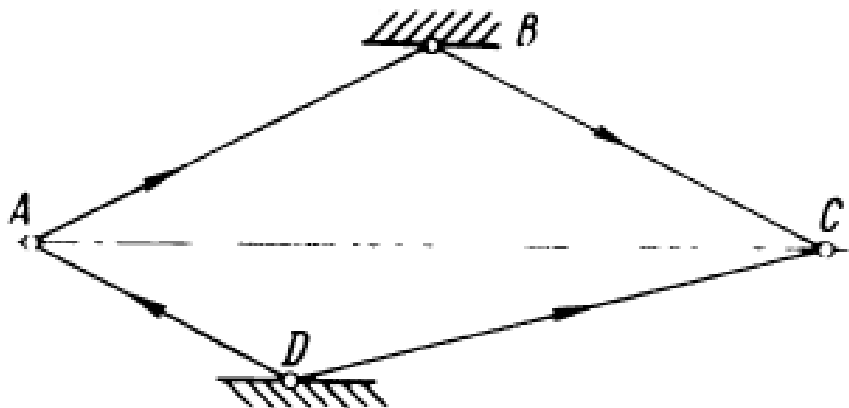


Рис. 1.2. Пояснення поняття часової когерентності

Якщо $\delta_0/c \ll t$, то в точці С спостерігають взаємну кореляцію двох частин цугу, тобто когерентність. При $\delta_0/c > t$ кореляції не буде, тобто не буде і когерентності. Час t характеризує тривалість цугу, і називається часом когерентності, а когерентність – часовою. Відстань $l = ct$ називають довжиною когерентності випромінювання.

Поняття просторової когерентності характеризує кореляцію між електромагнітними коливаннями в різних точках простору в один і той же момент часу. Так, якщо $E_1(t)$ – електромагнітна хвиля в точці В (рис. 1.3), $E_2(t)$ – в точці D і $E(t)$ в точці С, то :

$$E(t) = E_1(t - t_1) + E_2(t - t_2),$$

де t_1 і t_2 – час, за який хвиля проходить відповідно відстані ВС і DC.

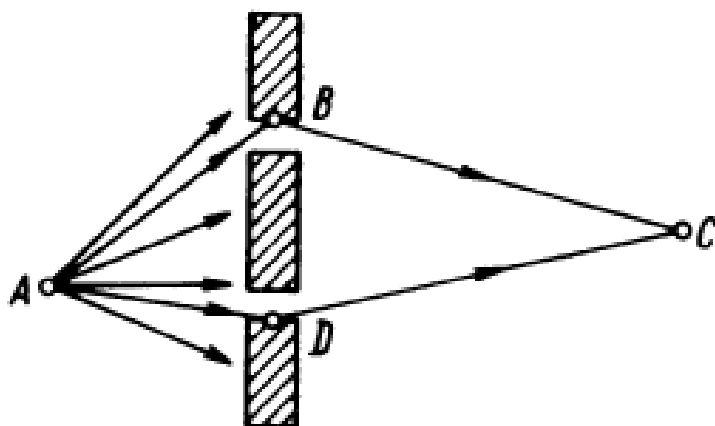


Рис. 1.3. Пояснення поняття просторової когерентності

Окрім цього можна зазначити, що чим вужчий частотний інтервал випромінювання електромагнітної хвилі $\Delta\nu$, тим вища степінь монохроматичності цього випромінювання та тим вища степінь часової когерентності.

З поміж усіх джерел випромінювання оптичного діапазону газові лазери характеризуються найбільшою степеню когерентності та монохроматичності випромінювання. Крім того, газові лазери мають наступні позитивні властивості : висока стабільність та відтворюваність частоти випромінювання, малий кут розходження променя, мала чутливість до змін температури навколишнього середовища. Тому при

розробці пристроїв, призначених для прецизійного вимірювання параметрів руху, газові лазери, збуджувані електричним зарядом, знайшли широке розповсюдження.

Основними характеристиками газових лазерів являються :

- довжина хвилі (λ) або частота (ν) випромінюваних електромагнітних коливань. Сучасні лазери генерують в діапазоні хвиль 0,23 – 583 мкм ($1,3 \cdot 10^{15}$ – $5,57 \cdot 10^{11}$ Гц);
- потужність випромінювання в неперервному режимі. Для газових лазерів вона може становити десятки та сотні Ват;
- кутове розходження променю. Воно становить десятки кутових секунд або одиниці кутових хвилин. Ширину променю за допомогою системи лінз можна звужити до величини, яка обмежена явищем дифракції;
- спектр випромінювання. Найменший спектр випромінювання газових лазерів визначається інтервалом частот електромагнітних коливань, генеруючих лазером.
- ККД газових лазерів. Він становить частку відсотка та визначається відношенням потужності випромінювання до потужності джерела накачування, вираженим у відсотках.

Під ефектом Доплера розуміють зміну частоти електромагнітного випромінювання при відносному русі приймача та джерела випромінювання. Якщо приймач та джерело випромінювання знаходяться в одній системі координат, а випромінювання віддзеркалюється від іншої, то при відносному русі цих двох інерційних систем координат має місце двократний ефект Доплера. В цьому випадку доплерівська зміна частоти відбитого світлового випромінювання буде розраховуватися по формулі :

$$\Omega_0 = 2\omega V/c,$$

де ω – кругова частота випромінювання; V – радіальна складова швидкості руху об'єкта; c – швидкість світла.

Несуча частота сигналу – це частота вихідного сигналу ЛВС, тобто частота вихідного сигналу (фотоприймача) при відсутності частотної модуляції.

Нерідко несучу частоту визначають як різницю між частотою випромінювання ω лазера 1 та частотою $(\omega + \Omega)$ випромінювання лазера, зрушеного на величину Ω за допомогою будь-яких пристроїв 6 (рис. 1.4). Суміщення в просторі випромінювань з частотами ω та $(\omega + \Omega)$ проводиться за допомогою світлоділних кубиків 2, 3 та відбиваючих дзеркал 5, 7. Вихідний сигнал фотоприймача 4 при цьому розраховується по формулі :

$$u_{\phi n}(t) = U \sin \Omega t,$$

де $\Omega = (\omega + \Omega) - \omega$ – несуча частота сигналу.

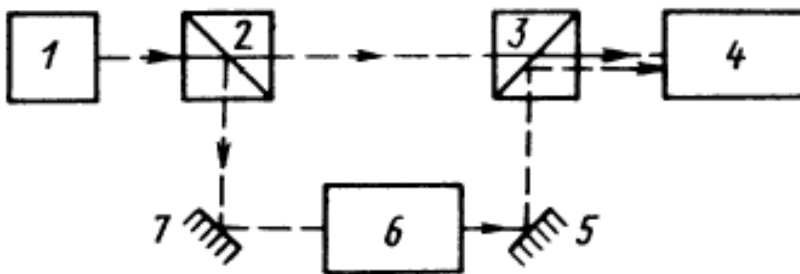


Рис. 1.4. Пояснення поняття несучої частоти сигналу

При русі об'єкта вимірювання (наприклад, коливальному, гармонічному, рис. 1.5), доплерівська зміна частоти випромінювання, відбитого від об'єкта вимірювання, визначають за допомогою співвідношення :

$$\omega_D = \frac{2\omega V_0}{c} \cos \omega_0 t,$$

де ω – кругова частота випромінювання лазера, ω_0 – кругова частота коливань об'єкта вимірювань, V_0 – амплітуда швидкості коливань об'єкта вимірювань.

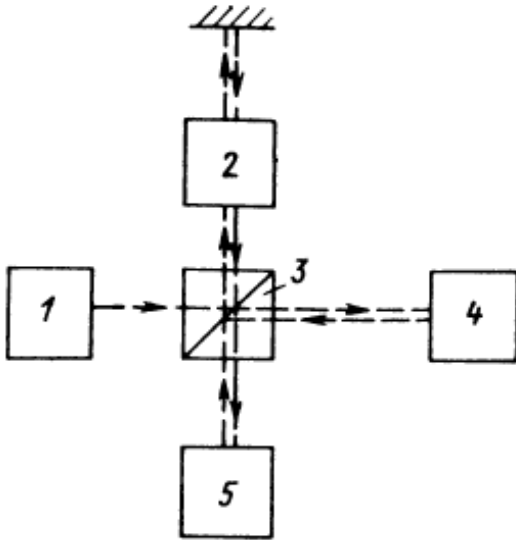


Рис. 1.5. Пояснення поняття індексу частотної модуляції :

1 – лазер; 2 – засіб зміщення частоти випромінювання; 3 – світлодільний кубик; 4 – об’єкт вимірювання; 5 – фотоприймач

При цьому, вихідний частотно-модульований сигнал фотоприймача розраховується по формулі :

$$u(t) = U \cos\left(\Omega t + \frac{2\omega V_0}{c\omega_0} \sin\omega_0 t\right)$$

а величина m_f розраховується по формулі :

$$m_f = \frac{2\omega V_0}{c\omega_0}$$

Вона характеризує степінь частотної модуляції та носить назву індекс модуляції. Якщо він менше одиниці, частотну модуляцію називають вузько смуговою. Якщо індекс модуляції $m_f = 3 \dots 5$, модуляцію називають широко смуговою.

Під девіацією частоти розуміють відношення $\Delta\omega = 2\omega V_0/c$, яке рівне частоті Доплера. Як при вузько смуговій, так і при широко смуговій модуляції амплітуда відхилення частоти, тобто девіація, зазвичай набагато менша несучої частоти.

1.2. Геометрикооптичне та хвильове представлення лазерного пучка

Теорія відкритих оптичних резонаторів використовує два способи для визначення властивостей резонаторів : геометрикооптичний, заснований на уявленні про промені, та хвильовий, при якому випромінювання розглядається як хвиля. Відносно цього й сам пучок лазерного випромінювання представляється або як набір (пакет) прямолінійних променів, які закреслюють деяку область простору, або як хвильове обурення, яке має місце в даній області простору.

Особливий інтерес представляє визначення властивостей лазерного пучка, який сформований конфокальним (або еквівалентним йому) резонатором. Найбільш суттєвими характеристиками пучка являються кривизна хвильового фронту та гіперболічний характер зміни поперечного розміру пучка вздовж вісі розповсюдження.

В геометричній оптиці ця задача вирішується шляхом визначення траєкторії променя при його наступному віддзеркаленні від дзеркал резонатора. Для визначення траєкторії променя в симетричному резонаторі застосовують формули параксіальної геометричної оптики.

Розрахувавши траєкторії променів, можна знайти область всередині резонатора, яка «закреслена» пакетом променів, та її обвідну.

Виявляється, що існує схожість пакету променів з хвильовим пучком лазера. Обвідної родини променів в пакеті променів відповідає траєкторія точки, в якій відносна доля потужності випромінювання залишається постійною вздовж вісі розповсюдження. Як і у пакеті променів, це гіпербола. Однак існує суттєва відмінність між двома уявленнями лазерного пучка. Якщо представити, що промені це нормалі до хвильового фронту, то в хвильовій моделі ці промені криволінійні. Та навпаки, в геометрикооптичній моделі вийде, що промені не являються нормаллями до фронту хвилі.

Ця невідповідність з'являється внаслідок того, що закони класичної геометричної оптики недійсні поблизу джерела та його зображення, а також поблизу фокальних площин та каустик, де якраз і спостерігається вказана невідповідність.

Але можна вважати, що геометрикооптичне та хвильове представлення однозначні. Кожне з них можна використовувати для опису законів розповсюдження лазерного випромінювання як у вільному просторі, так і в оптичних системах.

1.3. Просторові параметри та характеристики лазерного випромінювання

Опис законів розповсюдження лазерного випромінювання у вільному просторі та в оптичних системах проводиться за допомогою просторових параметрів. До них відносяться діаметр пучка та розходження, кривизна хвильового фронту, діаграма направленості, розподіл щільності потужності (енергії) в поперечному перерізі пучка, вісь діаграми направленості, ближня та дальня зони лазерного випромінювання.

Під діаметром лазерного випромінювання розуміють діаметр поперечного перерізу пучка лазерного випромінювання, всередині якого проходить задана доля енергії або потужності лазерного випромінювання. Більш розповсюжене друге визначення діаметра пучка, під яким розуміється відстань між двома точками, в яких амплітуда або інтенсивність поля зменшується в деяке число разів у порівнянні з максимальним значенням.

Діаграма направленості лазерного випромінювання – це кутове розподілення енергії або потужності лазерного випромінювання. Вісь діаграми направленості лазерного випромінювання представляє собою пряму, яка проходить крізь максимум кутового розподілення енергії або потужності лазерного випромінювання. При симетричному розподіленні поля вісь діаграми направленості співпадає з прямою, яка з'єднує енергетичні центри тяжкості перерізів пучка, тобто з енергетичною віссю пучка.

Дальня зона лазерного випромінювання представляє собою область простору вздовж осі лазерного пучка, яка знаходиться на такій відстані від випромінювача лазера, починаючи з якої діаграма направленості залишається постійною. Як буде видно під час розглядання поняття розходження, у хвильовому представленні воно носить дифракційний характер незалежно від того, обмежений лазерний пучок реальною діафрагмою чи ні. Відомо, що при описанні дифракції користуються поняттям зони

Френеля та зони Фраунгофера. Дальня зона лазерного випромінювання відповідає зоні Фраунгофера.

Розходження лазерного випромінювання – це плоский кут, який характеризує ширину діаграми направленості лазерного випромінювання в дальній зоні по заданому рівню кутового розподілення енергії або потужності лазерного випромінювання, що визначається по відношенню до його максимального значення. Це розходження іноді називають кутовим на відміну від енергетичного розходження, яке представляє собою тілесний кут, всередині якого розповсюджується задана доля енергії або потужності лазерного випромінювання.

Просторові параметри лазерного пучка бувають відомі через вимірювання або можуть бути розраховані по відомим параметрам резонатора. Зв'язок параметрів пучка з параметрами резонатора визначається типом резонатора.

1.4. Принцип вимірювання вібрації електромеханічними віброметрами

Датчик вібрації, заснований на законі електромагнітної індукції, перетворює швидкість встановленої лінійної вібрації, яка діє у вертикальному та горизонтальному напрямках, в електричну напругу.

При перетині полем постійного магніту витків котушки, яка жорстко зв'язана з корпусом датчика, в ній індукується ЕРС, величина якої пропорційна швидкості відносного переміщення магніту та котушки, яка закріплена в корпусі датчика. Основною величиною, яка характеризує датчик, являється його чутливість, яка вираховується по наступній спрощеній формулі :

$$k = (u \cdot 1,41) / fS,$$

де k – чутливість датчика, мВ/мм·Гц; u – напруга на виході датчика, мВ; f – частота вібрації, Гц; S – амплітуда, мм.

Датчик вібрації МВ представляє собою збалансовану масу (постійний магніт) 1, яка розміщена всередині корпуса датчика 2, в якому розміщена котушка 3. Постійний

магніт зв'язаний з корпусом датчика спеціальними підшипниками 4, які складаються з трьох секторів та розміщені під кутом 120° один до одного.

Середнє положення магніту у напрямку осі датчика, яка співпадає з напрямом вимірювання параметрів вібрації, забезпечується двома циліндричними пружинами 7 та 8.

При дії сили обурення у напрямку осі вимірювання сектора дають можливість рухомій системі переміщатися відносно корпуса датчика. Так як власна частота рухомої системи (магніт пружини) вибрана значно менша, ніж частота вимірюваної вібрації, магніт майже буде залишатися у спокої.

Магнітний потік постійного магніту проходить крізь два повітряних зазори та замикається через сталевий корпус датчика. У повітряному зазорі розміщена циліндрична котушка 3. Два кінця котушки виведені до розетки. Для зменшення впливу власних коливань системи датчика зроблено потовщення каркасу котушки, в якому при відносному русі магніту наводяться індукційні струми.

Магнітні потоки індукційних струмів при взаємодії з основним потоком згладжують власні коливання рухомої системи датчика. Датчик кріпиться на двигуні у місці вимірювання вібрації без амортизаційних засобів.

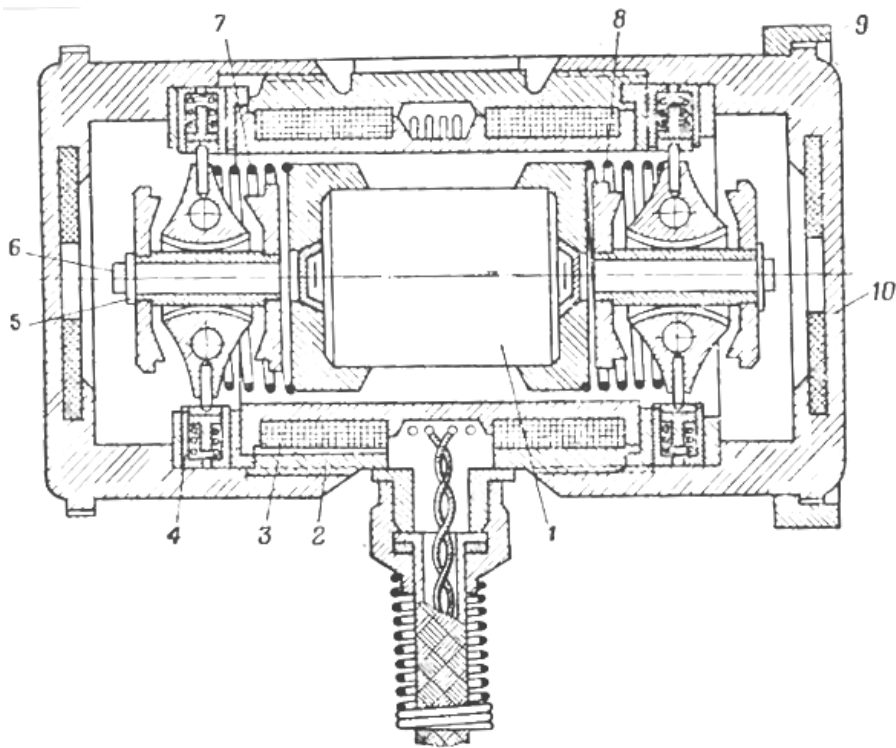


Рис. 1.6. Конструкція датчика вібрації: 1 – збалансована маса; 2 – корпус датчика; 3 – котушка; 4 – підшипник; 5 – шайба; 6 – гвинт; 7, 8 – циліндричні пружини; 9 – фланець; 10 - кришка

Основні технічні дані апаратури вимірювання вібрації :

1. Максимальний діапазон частот, який контролюється апаратурою : 30-200 Гц;
2. Межа вимірювання віброшвидкості : 200 мм/сек;
3. Похибка вимірювання віброшвидкості не перевищує 15% вимірюваної величини.

Отже, лазерні системи можуть функціонувати на різних принципах, що реалізують ті або інші властивості лазерного випромінювання, обумовлені його когерентністю. Монохроматичність використовується для захисту від фонового випромінювання, спрямованість, завдяки концентрації енергії, дозволяє проводити вимірювання протяжних трасах, просторова і часова когерентності лежать в основі різноманітних інтерференційних схем вимірювання. Використання коротких та надкоротких лазерних імпульсів підсвітки зводить багато завдань динамічних вимірів до статичних, усуваючи вплив вібрацій та зміщень об'єкта.

Управління параметрами випромінювання як у просторової (структуровані лазерні пучки), так і тимчасової (тривалість імпульсів, частота електромагнітної хвилі) сприяє подальшому розширенню спектру дистанційних безконтактних методів вимірювання геометричні параметри виробів.

В області вимірювань лінійних розмірів корпусних виробів аерокосмічного призначення з характерною довжиною $\sim 1 \dots 10$ м та допустимими похибками $0,01 \dots 1$ мм (фюзеляж, космічні апарати, розгінні блоки, обтічники тощо), оптимальним поєднанням робочих дистанцій, похибок вимірювань та їх продуктивності в даний час мають лазерні комп'ютеризовані системи типу FARO Laser Tracker, MV200 і т.п. Вони мають робочу зону вимірювань лінійною мірою до 100 м, а в кутовий: 270° за азимутом і не менше $\pm 50^\circ$ по кутку місця. Похибки виміру відстаней на дистанціях ~ 1 м становлять 10 мкм і приблизно пропорціонально збільшуються до 100 мкм на дистанціях ~ 10 м, похибка кутових вимірів не перевищує 10° .

В наступному розділі буде розглянуто використання лазерних систем з частотною модуляцією для безконтактного контролю вібрацій.

РОЗДІЛ 2

ВИКОРИСТАННЯ ЛВС З ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ

2.1. Електрооптичні перетворювачі одночастотного когерентного випромінювання в двочастотні

Спочатку розглянемо проходження циркулярно поляризованого випромінювання через кристал $LiNbO_3$, поміщений в обертове магнітне поле (рис. 1.7).

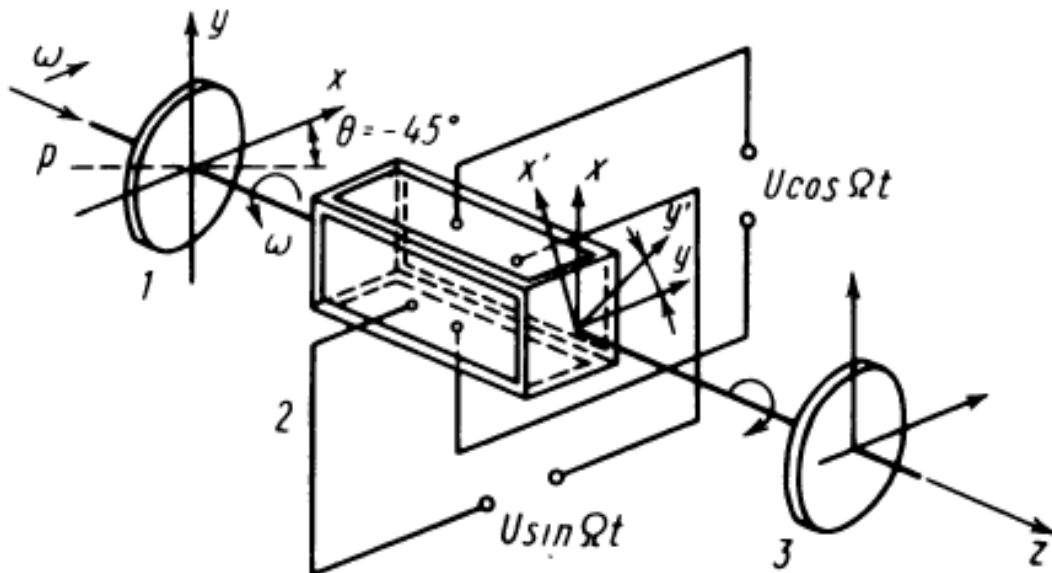


Рис.2.1. Електрооптичний перетворювач частоти випромінювання

Якщо випромінювання в кристалі поширюється вздовж оптичної осі і до кристала прикладені напруги u_x і u_y , то випромінювання вздовж заданих осей x' і y' ділиться на дві частини, які повернуті від головних осей на кут θ .

Розрахувати показники заломлення по заданих осях можна за наступними формулами:

Кафедра авіоніки							
Виконав	Соляник Р.О.			Авіаційний лазерний вимірювач вібрацій	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник	Землянський В..				13		
Консульт.					173 «Авіоніка»		
Н-контр.	Левківський В.В.						
Зав. каф.	Грищенко Ю.В.						

$$n_{x'} = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r_{22} \sqrt{E_x^2 + E_y^2};$$

$$n_{y'} = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{22} \sqrt{E_x^2 + E_y^2}.$$

Також можна розрахувати зсув фаз між компонентами випромінювання з напрямком поляризації по осях x і y після проходження через кристал довжини l і товщини d :

$$\delta = \frac{2\pi l}{\lambda d} (n_{x'} - n_{y'}) = \frac{2\pi l}{d\lambda} n_0^3 r_{22} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = K_1 \sqrt{u_x^2 + u_y^2}.$$

В електрооптичному перетворювачі лінійно поляризоване випромінювання проходить через нерухому чвертьхвильову пластинку 1, встановлену під кутом $\theta_1 = -45$ градусів, і електрооптичний кристал 2, в якому створюється обертове електричне поле.

Електрооптичний перетворювач може працювати двояко: з напругою на кристалі, що дорівнює півхвилі або чвертьхвилі затримки.

Електрооптичний перетворювач з проходженням лінійно поляризованого випромінювання через електрооптичний кристал подібний до електрооптичного перетворювача з проходженням лінійно поляризованого випромінювання через фазову пластину, що обертається.

Дослідження електрооптичних перетворювачів показує, що їх основними перевагами є висока стабільність частоти перетворення, яка визначається стабільністю формуючої частоти, що створює обертове електричне поле, а також відносно висока частота перетворення (до 10 МГц) у порівнянні до електромеханічних перетворювачів.

Електрооптичні перетворювачі ефективно використовуються в ЛВС: при проходженні циркулярно поляризованого випромінювання через електрооптичний кристал (при $\delta = \pi$) в одному з плечей лазерної системи; при проходженні лінійно поляризованого

випромінювання через електрооптичний кристал для створення двох частотних режимів роботи джерела випромінювання шляхом його встановлення між джерелом випромінювання та оптичною частиною лазерної системи.

До недоліків електрооптичних перетворювачів можна віднести обмеження апертури, а також нерівномірність АЧХ електрооптичних кристалів, що призводить до різкого зниження амплітуди вихідного сигналу електрооптичних перетворювачів. конвертер на деяких моделюючих частотах.

2.2. Контроль нерівномірності швидкості руху одно частотними лазерними системами з частотною модуляцією

Завдання безконтактного контролю нерівномірності швидкості руху вирішується за допомогою тридзеркальної лазерної системи (рис. 2.2).

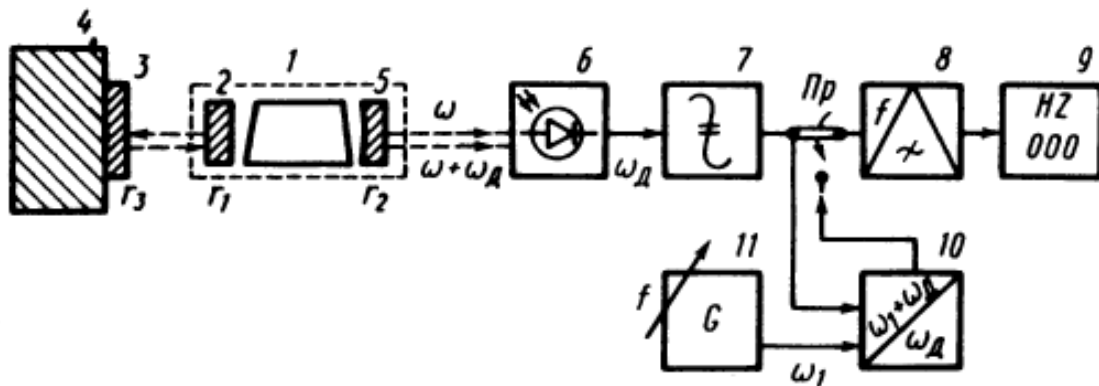


Рис. 2.2. Тридзеркальна лазерна система контролю нерівномірності швидкості руху

Когерентне випромінювання лазера 1, відбившись від дзеркала 3, яке закріплене на рухомому вузлі 4, що робить зворотно поступальний рух з постійною швидкістю V , вертається в резонатор лазера. Відбите від дзеркала 3 опорне випромінювання лазера крізь сферичне дзеркало 5 направляється на фотоприймач 6.

Активне середовище лазера 1 при проходженні через неї відбитого від дзеркала 3 випромінювання поводить себе як підсилювач, у якого є зворотній зв'язок.

Потужність вихідного випромінювання лазера після проходження дзеркала розраховується по формулі :

$$P_{\text{вих}} = \frac{(1-r_2)[(1-r_1)P_0P_1]^{1/2}}{(1-K_{\text{ос}})K_{\text{ос}}}$$

Вихідний сигнал фотоприймача 6 буде описуватись формулою :

$$u = K_{\text{фн}}[E_0^2 + E_1^2 + 2E_0E_1 \cos(2\pi\delta_0/\lambda + \omega_\delta t) \cos 2\pi n],$$

Вихідний сигнал фотоприймача після проходження амплітудного обмежувача 7 подається на частотний детектор 8, який відтворює закон зміни частоти ω_δ , а потім на реєструючий пристрій 9. Якщо швидкість руху вузла 4 рівномірна, то доплерівський здвиг буде також постійним. При цьому на виході обмежувача 7 будемо мати гармонічні коливання з постійною частотою, а на виході частотного детектора – змінну напругу з нульовою амплітудою. При зміні швидкості руху ΔV вузла 4 буде змінюватись і ω_δ пропорційно швидкості руху, що відповідає зміні напруги на виході частотного детектора пропорційно ΔV . Прокалібрувавши частотний детектор з реєструючим пристроєм, з достатньою точністю можна визначити нерівномірність швидкості руху вузла 4. Чутливість лазерної системи значно збільшується при складанні вихідного сигналу обмежувача 7 з електричним сигналом генератора 11 в суматорі 10. В результаті складення напруга биття з частотою $\omega_1 - \omega_\delta$ подається на частотний детектор з більш низькою центральною частиною, тобто з більш високою чутливістю до зміни частоти ω_δ .

Основним недоліком тридзеркальної лазерної системи являється обмеження в русі вузла 4 довжиною резонатора лазера l_a . Розміщення вимірювальної частини лазерної системи не може бути мимовільним. Відношення $l_n/l_a = 1$ являється найбільш оптимальним, і тому має відповідати середині проміжку руху вузла. Верхня межа швидкості руху контролюючого вузла визначається смугою пропускання лазерної системи. Для лазера з довжиною резонатора $l_a = 168$ мм $\Delta f_{\text{рез}} = 4$ МГц. Це означає, що верхня межа швидкості руху контролюючого вузла не має перевищувати 1м/с.

2.3. Вимірювання параметрів кутових коливань ЛВС за допомогою скануючи пристроїв

Принцип вимірювання параметрів кутових коливань за допомогою скануючих пристроїв заключається в наступному. Когерентне випромінювання, яке виходить з точки A (рис. 2.2), що лежить на осі z , описує кругову траєкторію в площині xoy об'єкта. Якщо площина xoy перпендикулярна осі z , то шлях, який проходить випромінювання від точки A до площини xoy при скануванні не змінюється.

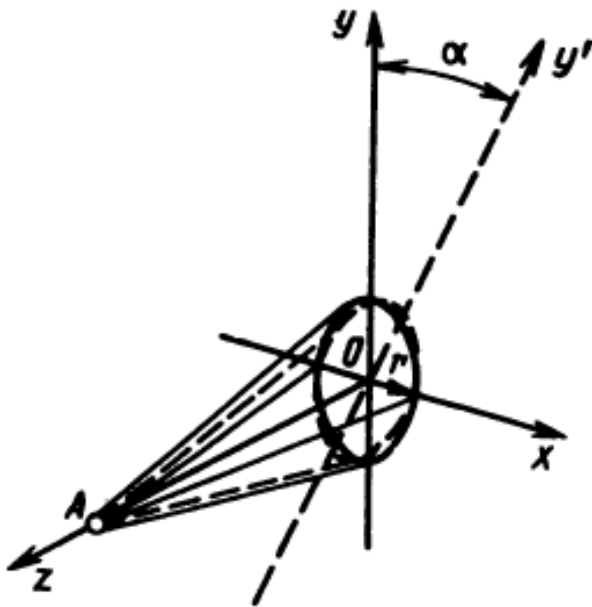


Рис. 2.3. Пояснення принципу вимірювання кутових коливань

При відхиленні площини xoy від початкового положення на кут α шлях, який проходить випромінювання при скануванні площини xoy по окружності радіуса r , змінюється на величину l по залежності :

$$l = E_m \sin(\omega_1 t + \varphi),$$

де $E_m = r t g \alpha$ – амплітуда зміни оптичного шляху випромінювання; ω_1 – кутова частота сканування випромінювання; φ – початкова фаза.

Швидкість зміни оптичного шляху, еквівалентна швидкості відносно руху точки A та точки, що рухається по площині $x'y'$, та розраховується по формулі :

$$V = \frac{dl}{dt} = \omega_1 r \operatorname{tg} \alpha \cos(\omega_1 t + \varphi)$$

При сприйманні випромінювання, відбитого від площини хоу, виникає доплерівський здви́г частоти :

$$\omega_{\text{Д}} = \frac{2\omega_1 \omega r \operatorname{tg} \alpha \cos(\omega_1 t + \varphi)}{c}$$

В якості дефлекторів можна використовувати неперервні заломлюючі дефлектори кругового сканування, які основані на використанні прямокутних призм.

Розглянемо особливості вимірювання кутових коливань на прикладі двох частотної ЛВС зі скануючим пристроєм (Рис. 2.3).

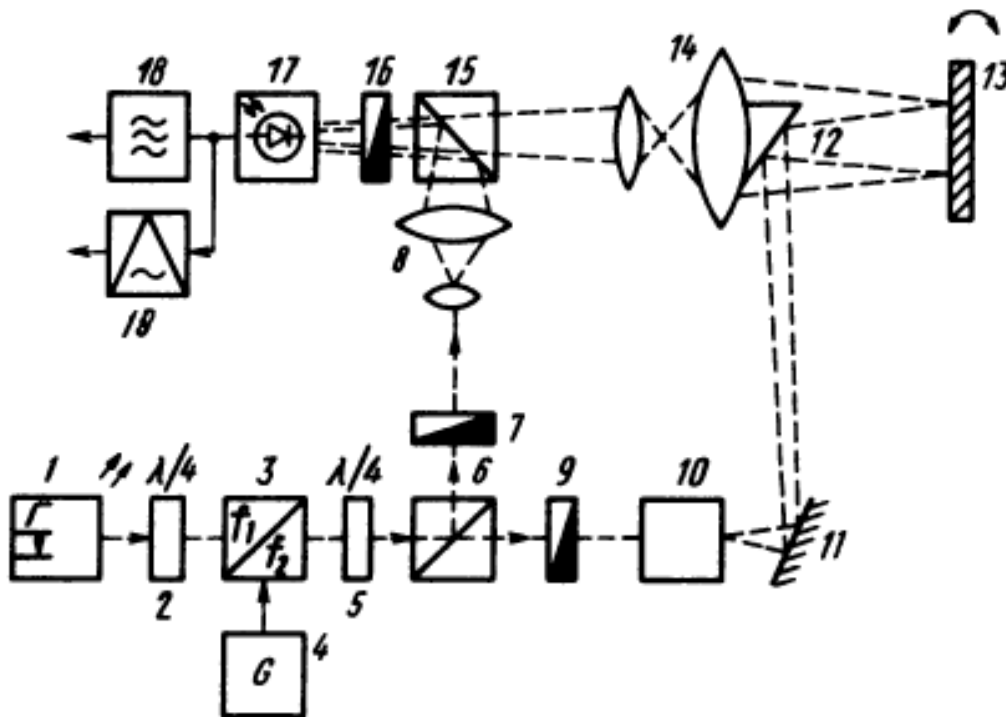


Рис. 2.4. Лазерна система вимірювання кутових коливань зі сканувальним пристроєм

Випромінювання лазера 1, пройшовши через електрооптичний перетворювач, який складається з двох чверть хвильових пластин 2, 5, електрооптичного кристала 3, формувача 4, ділиться світлоділним кубиком 6 на дві частини. Одна частина через поляризатор 9, дефлектор 10, нерухомі відбивачі 11, 12 направляється на об'єкт вимірювання 13, який виконує кутові коливання.

Радіус окружності сканування розраховується наступним чином :

$$r = LtgY,$$

де L – відстань від дефлектора до об'єкта; $2Y$ – кут при вершині, який описується скануючим випромінюванням.

Відбитий від об'єкта 13 оптичний сигнал направляється на оптичну систему 14 та поляризатор 16 під кутом $Y + 2\alpha \sin(\omega_1 t + \varphi)$ та суміщається за допомогою світлодільного кубика 15 з опорним оптичним сигналом, який пройшов поляризатор 7 та розширювач 8.

Матриця сукупності елементів, крізь які проходить випромінювання в опорному плечі ЛВС, має наступний вигляд :

$$M_{\text{оп}} = R_{16} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} R_{15} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{15} \end{vmatrix} \times \\ \times R_7 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} R_6 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_6 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & j \\ \sqrt{2} & 1 \end{vmatrix} \times \\ \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega t & -j \sin \Omega t \\ j \sin \Omega t & 1 - j \cos \Omega t \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ \sqrt{2} & 1 \end{vmatrix}$$

Матриця з урахуванням проходження когерентного випромінювання, яке описується вектором E , прийме вигляд :

$$L_{\text{оп}} = E_0 \exp j\omega t \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix},$$

де $E_0 = ED_0$.

Матриця сукупності елементів, крізь які проходить випромінювання у вимірювальному плечі, має наступний вигляд:

$$M = R_{16} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} R_{15} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_{13} \exp j \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} r \operatorname{tg} \alpha \sin \omega_1 t \right\} \times \\ \times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{13} \end{vmatrix} R_{12} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{12} \end{vmatrix} \times$$

$$\begin{aligned} & \times R_{11} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{11} \end{vmatrix} R_{10} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \exp -\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \end{vmatrix} \times \\ & \times R_9 \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_6 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\ & \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega t & -j \sin \Omega t \\ j \sin \Omega t & 1 - j \cos \Omega t \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

де α_1 – кут падіння вимірювального оптичного сигналу на фотокатод, який має розмір квадрату зі стороною a .

Матриця з урахуванням проходження когерентного випромінювання буде виглядати наступним чином :

$$L = E_1 \exp j \left[(\omega - \Omega)t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \right] \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix},$$

де $E_l = ED_l$.

Сумарний вектор електричного поля розраховується за наступною формулою :

$$L_\Sigma = E_0 \exp j \left\{ \omega t \right\} + E_1 \exp j \left[(\omega - \Omega)t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \right]$$

Інтенсивність, пропорційна енергії світлової хвилі на вході фотоприймача розраховується за формулою :

$$W = \frac{1}{8\pi} \operatorname{Re} [L_\Sigma L_\Sigma^*]$$

Змінна складова вихідного сигналу фотоприймача має вигляд :

$$u = U \frac{\sin \frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1} \cos \left[\Omega t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t \right]$$

Максимальне значення амплітуди має місце при значенні

$$U^* = \frac{\sin \frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha_1}{\frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha_1} = 1$$

що відповідає значенню $\alpha_1 = 0$. Цей випадок відповідає ідеальному просторовому суміщенню опорного та вимірювального оптичних сигналів, що на практиці здійснити майже неможливо.

Відносне ослаблення амплітуди змінної складової вихідного сигналу фотоприймача в залежності від розміру фотокатода фотоприймача та кута між опорним та вимірювальним оптичними сигналами показано на рис. 2.4.

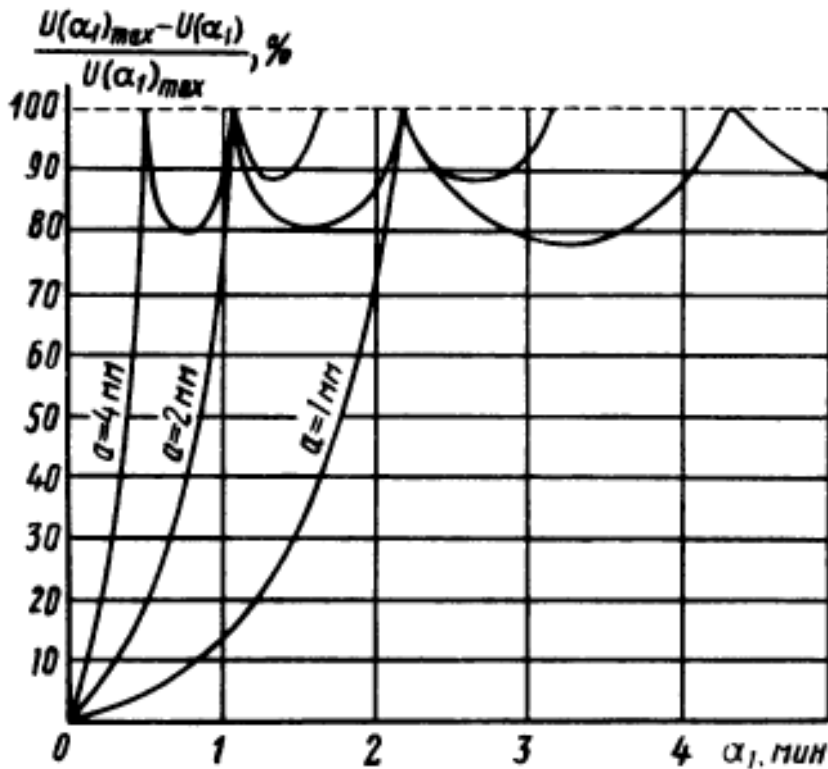


Рис. 2.5. Відносне ослаблення амплітуди вихідного сигналу фотоприймача в залежності від кута падіння вимірювального оптичного сигналу та розмірів фотокатода.

При цьому видно, що умова оптимального узгодження оптичних сигналів реалізується при незначних кутах падіння. Маємо також ярко виражену залежність допустимого кута неузгодженості від розмірів фотокатода. Однак, зменшення розмірів

фотокатоду веде до збільшення величини амплітуди вихідного сигналу фотоприймача до та зменшенню відношення сигнал/шум на його виході.

В реальних системах при скануванні поверхні об'єкта вимірювальний оптичний сигнал, який сфокусований на чутливу поверхню фотоприймача, рухається по утворюючій тілесного кута, ось якого складає кут β з нормаллю до чутливої поверхні. Кутове розходження випромінювання відбитого від об'єкта вимірювання за допомогою оптики 14 зменшується в K разів.

У цьому випадку матриця дефлектора 10 з оптикою 14 буде мати вигляд :

$$R_{10} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \exp - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \left[(\beta - \alpha_1) + \frac{\gamma + 2\alpha \sin(\omega_1 t + \varphi)}{K} \right] \end{vmatrix}$$

Матриця вимірювального плеча з урахуванням проходження когерентного випромінювання :

$$L = E_1 \exp j \left\{ (\omega - \Omega)t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \left[(\beta - \alpha_1) + \frac{\gamma + 2\alpha \sin(\omega_1 t + \varphi)}{K} \right] \right\}$$

Змінна складова вихідного сигналу фотоприймача :

$$u = K_{\text{фп}} E_0 E_1 \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} \sin \left[(\beta - \alpha_1) + \frac{\gamma + 2\alpha \sin(\omega_1 t + \varphi)}{K} \right]}{\frac{\pi}{\lambda} \sin \left[(\beta - \alpha_1) + \frac{\gamma + 2\alpha \sin(\omega_1 t + \varphi)}{K} \right]} \times \\ \times \cos \left[\Omega t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t \right],$$

де $m_f = (4\pi r \operatorname{tg} \alpha) / \lambda$ – значення індексу частотної модуляції.

Як слідує із цього виразу, при наявності кутового здвигу об'єкта ($\alpha \neq 0$) амплітуда змінної складової вихідного сигналу фотоприймача змінюється з частотою сканування об'єкта ω_1 за рахунок зміни періоду інтерференційних смуг у відповідності $\alpha = nr$. Амплітуда змінної складової вихідного сигналу фотоприймача у цьому випадку

зміниться в межах від максимального значення до $\alpha = \pi r$. Азимут нахилу поверхні об'єкта визначається значенням фази φ . Величина фази φ може бути знайдена шляхом порівняння з фазою електричного сигналу сканування частотою ω_1 , який подається на вхід дефлектора. Крім того, значення фази φ визначає фазу амплітуди девіації частоти. При значенні $\Omega = 0$ величина фази φ може бути знайдена шляхом демодуляції ЧМ сигналу та порівнянні фази знайденого сигналу з фазою сигналу управління дефлектором. При значенні $\Omega = 0$ значення фази φ знаходиться шляхом порівняння фази сигналу частоти ω_1 (вихідного сигналу фотоприймача) з фазою сигналу управління дефлектором.

Таким чином, вихідний сигнал смугового фільтра 18, який має центральну частоту Ω , знаходиться за формулою :

$$u = U J_0(m_f) \cos \Omega t,$$

де $J_0(m_f)$ – функція Бесселя нульового порядку аргументу m_f .

Кутове зміщення об'єкта знаходиться по формулі :

$$\alpha_m = \arctg [\lambda (m_f)_m / (4\pi r)],$$

де $(m_f)_m$ – значення індексу частотної модуляції, яке відповідає кореням $J_0(m_f)_m = 0$.

Так, при $r = 10$ мм першому нулю функції Бесселя відповідає кутове зміщення об'єкта вимірювання $\alpha_1 = 2,494$ с, другому $\alpha_2 = 5,738$ і т.д.

Напруга на виході частотного детектора 19 являє собою похідну від змінної фази вихідного сигналу фотоприймача та розраховується по формулі :

$$u_{\text{чд}} = s_{\text{чд}} \frac{d \left[\int_0^t \omega_{\text{Д}}(t) dt \right]}{dt} = K \sin \omega_1 t,$$

При цьому :

$$K = s_{\text{чд}} \frac{4\pi}{\lambda} r \operatorname{tg} \alpha.$$

Азимут нахилу поверхні об'єкта вимірювання визначимо по величині початкової фази φ , яку виміряємо за допомогою фазометра, шляхом порівняння фаз сигналу з виходу частотного детектора 19 та сигналу, що подається на керуючий вхід дефлектора.

При $\Omega = 0$ двох частотна ЛВС становиться одно частотною. В цьому випадку обробку вихідного сигналу фотоприймача можна здійснити методом підрахунку числа імпульсів, які відповідають числу інтерференційних смуг, що реєструються фотоприймачем.

Середнє значення частоти Допплера, що реєструється за інтервал часу $t \geq 2\pi/\omega_1$: $f_{\text{дп}} = 4\omega_1 r t \text{tg}\alpha / (\lambda\pi)$.

Число імпульсів на виході фотоприймача, що реєструється за інтервал часу T , який дорівнює періоду сканування, як слідує із попереднього виразу :

$$N = 8 r t \text{tg}\alpha / \lambda.$$

При вимірювання кута α в секундах :

$$\alpha'' = (N\lambda/r) 25,78.$$

$$\text{Для } \lambda = 0,6328 \text{ мкм} : \alpha'' = (N/r) 16,29.$$

$$\text{При } t_i = 16,29 T/r \text{ значення кута} : \alpha'' = N10^{-2}.$$

В цьому випадку вимірювання α можна проводити за допомогою частотоміра 3, що підключається на вхід фотоприймача 1, з генератором 4, який задає час розрахунку імпульсів (рис. 2.5).

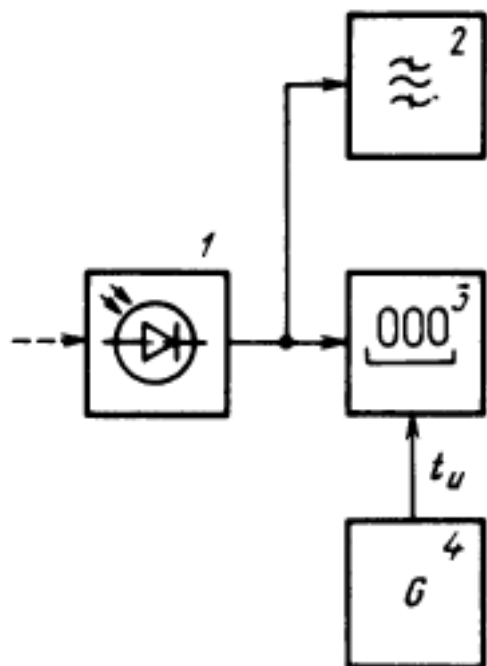


Рис. 2.6. Схема обробки вихідного сигналу фотоприймача

Особливості використання багатоканальних систем з частотною модуляцією для вимірювання параметрів кутових коливань розглянемо на прикладі двох каналної системи зі скануючим пристроєм для контролю кутових зміщень по двом координатам (рис. 2.6).

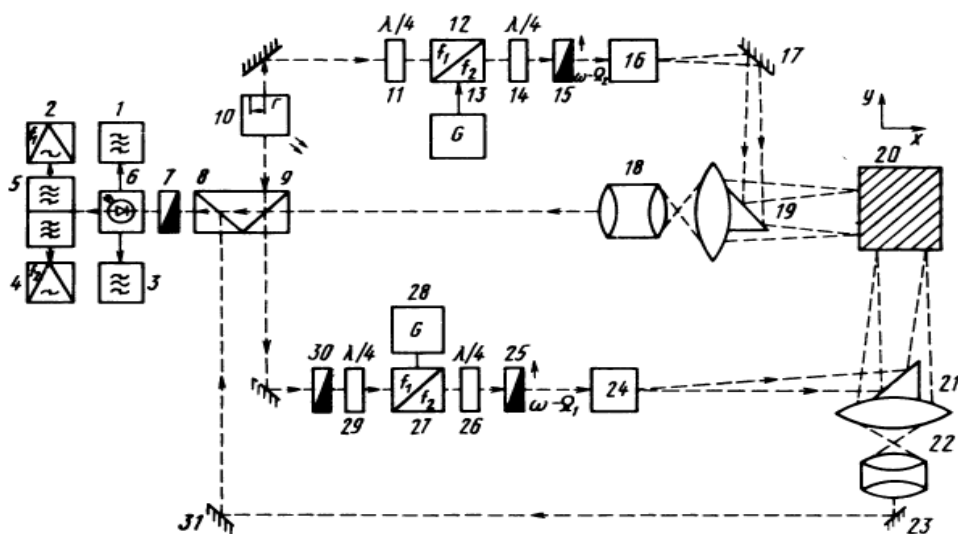


Рис. 2.7. Двоканальна лазерна система вимірювання кутових коливань зі скануючим пристроєм

Випромінювання лазера 10 у першому каналі проходить крізь чверть хвильові пластини 11, 14, електрооптичний кристал 12, який живиться від формувача 13,

поляризатор 15, дефлектор 16, нерухомі відбивачі 17, 19. У другому каналі випромінювання проходить крізь чверть хвильові пластини 29, 26, електрооптичний кристал 27, що живиться від формувача 28, поляризатори 25, 30, дефлектор 24 та нерухомий відбивач 21. Відбиті від об'єкта вимірювання 20 оптичні сигнали з частотами $\omega - \Omega_1$, $\omega - \Omega_2$ через оптичні системи 18, 22, нерухомі дзеркала 16, 23, 31, світлодільні кубики 8, 9 та поляризатор 7 направляються на фотоприймач 6, куди також поступає оптичний сигнал з частотою ω .

Вихідний сигнал фотоприймача поступає на смуговий фільтр 5, вузько смугові фільтри 1, 3, та частотні детектори 2, 4.

Матриця сукупності елементів, крізь які проходить випромінювання в першому вимірювальному каналі, має вигляд :

$$\begin{aligned}
 M_1 = & R_7 \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} R_8 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_9 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_{20} \exp j \left\{ \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t \right\} \times \\
 & \times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{20} \end{vmatrix} R_{19} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{19} \end{vmatrix} R_{17} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{17} \end{vmatrix} R_{16} \times \\
 & \times \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \exp -\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \end{vmatrix} R_{15} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \times \\
 & \times \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega_1 t & -j \sin \Omega_1 t \\ j \sin \Omega_1 t & 1 - j \cos \Omega_1 t \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -j \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix}.
 \end{aligned}$$

Матриця з урахуванням проходження когерентного випромінювання матиме вигляд :

$$L_1 = E_1 \exp j \left[(\omega - \Omega_1) t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \right] \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Матриця сукупності елементів, крізь які проходить випромінювання у другому вимірювальному каналі, матиме вигляд :

$$\begin{aligned}
M_2 = & R_7 \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} R_8 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_8 \end{vmatrix} \times \\
& \times R_{20} \exp j \left\{ \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha'}{\lambda} \sin \omega_1 t \right\} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{20} \end{vmatrix} R_{21} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{21} \end{vmatrix} \times \\
& \times R_{24} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \exp -\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_2 \end{vmatrix} R_{25} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & j \\ \sqrt{2} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
& \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega_2 t & -j \sin \Omega_2 t \\ j \sin \Omega_2 t & 1 - j \cos \Omega_2 t \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix} R_{30} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Матриця з урахуванням когерентного випромінювання матиме вигляд :

$$L_2 = E_2 \exp j \left[(\omega - \Omega_2)t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha'}{\lambda} \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_2 \right] \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix},$$

де α_0 , α_1 , α_2 – кути падіння вимірювальних та опорного оптичних сигналів на фотоприймач.

Матриця опорного плеча :

$$L_{\text{оп}} = E_0 \exp j \left(\omega t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_0 \right).$$

Сумарний вектор електричного поля :

$$\begin{aligned}
L_{\Sigma} = & E_0 \exp j \left(\omega t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_0 \right) + E_1 \exp j \times \\
& \times \left\{ (\omega - \Omega_1)t + \frac{4\pi r}{\lambda} \operatorname{tg} \alpha \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \right\} + \\
& + E_2 \exp j \left\{ (\omega - \Omega_2)t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha'}{\lambda} \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_2 \right\}
\end{aligned}$$

Змінна складова напруги на виході фотоприймача розраховується за формулою:

$$u = K_{\text{фп}} E_0 E_1 \frac{\sin \left\{ \frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0) \right\}}{\frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0)} \cos \left[\Omega_1 t + \frac{4\pi}{\lambda} r \operatorname{tg} \alpha \sin \omega_1 t \right] +$$

$$+ K_{\text{фп}} E_0 E_2 \frac{\sin \left\{ \frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_0) \right\}}{\frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_0)} \cos \left[\Omega_2 t + \frac{4\pi}{\lambda} r \operatorname{tg} \alpha' \sin \omega_1 t \right].$$

Для розділення носійних частот використовуються смугові фільтри 5. Напряга на виході вузько смугових фільтрів 1, 3 :

$$u_{\text{ф1}} = U J_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda} r \operatorname{tg} \alpha \right) \cos \Omega_1 t;$$

$$u_{\text{ф2}} = U J_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda} r \operatorname{tg} \alpha' \right) \cos \Omega_2 t.$$

Діапазони та граничні можливості вимірювання кутових зміщень об'єкта знаходяться методом вимірювання та характеристиками лазерної системи. При використанні одно частотних лазерних систем роздільну здатність знайдемо за допомогою виразу :

$$\alpha_{\min} = \operatorname{arctg} [\lambda / (8r)].$$

Так, при $\lambda = 0,6328$ мкм та $r = 5$ мм мінімальне кутове зміщення $\alpha_{\min} = 9,06$ с; при $r = 10$ мм $\alpha_{\min} = 4,526$ с. З попереднього виразу також слідує, що для збільшення роздільної здатності необхідно збільшувати радіус сканування поверхні об'єкта та мати засоби реєстрації дрібної частини інтерференційної смуги. Середнє значення частоти імпульсів на виході фотоприймача при скануванні об'єкта знаходимо за формулою :

$$f_{\text{дср}} = 4\omega_1 r \operatorname{tg} \alpha' / (\lambda\pi).$$

На рис. 2.8 наведені залежності $f_{\text{дср}} = F(\alpha, r, \omega_1)$, які побудовані у відповідності зі значенням частоти Допплера.

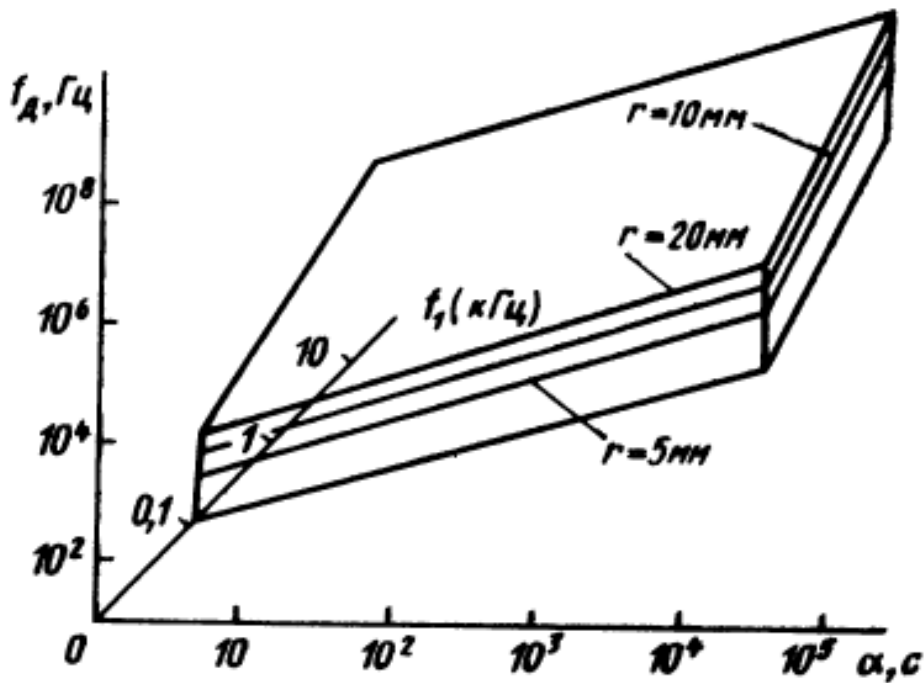


Рис. 2.8. Залежність частоти Доплера від частоти, радіуса сканування та кута α

Значення максимальної частоти на виході фотоприймача визначає швидкодію засобів обробки вихідного сигналу фотоприймача. По відомій швидкодії засобів обробки вихідного сигналу фотоприймача, з урахуванням, що

$$f_{D_{\max}} = \frac{\pi}{2} f_{D_{\text{ср}}},$$

знайдемо межі вимірювання.

Так, при $f_l = 10$ кГц та $r = 20$ мм максимально можливе вимірювальне кутове зміщення для $f_{D_{\max}} = 60$ МГц становить $\alpha = 1$ градус. При обробці вихідного сигналу фотоприймача за допомогою вузько смужової фільтрації мінімальне значення можливого кутового зміщення об'єкта вимірювання лежить в межах 2 с для лазерних систем з $\Omega = 0$ та 1,5 с для лазерних систем з $\Omega \neq 0$.

Максимальне значення контролюючого кутового зміщення об'єкта визначається апертурою приймальної оптичної системи, відстанню до об'єкта вимірювання, кутом падіння скануючого випромінювання на поверхню об'єкта та лежить в межах декількох градусів.

У лазерних систем з $\Omega \neq 0$ напруга на виході частотного детектора представляє собою похідну від змінної фази вихідного сигналу фотоприймача :

$$u_{\text{чд}} = s_{\text{чд}} \frac{d\left[\int_0^t \omega_{\text{Д}}(t) dt\right]}{dt} = s_{\text{чд}} \omega_{\text{Д}}(t)$$

Девіація частоти $\omega_{\text{Д}}(t)$ визначається величиною кутового зміщення об'єкта, параметрами сканування, та обмежується значенням несучої частоти Ω , а також співвідношенням між несучими частотами для багатоканальних систем. При зменшенні несучої частоти чутливість лазерних систем збільшується, однак у цьому випадку максимальне значення девіації частоти обмежено значенням несучої частоти, що призводить до зменшення верхньої межі вимірювання кутових зміщень об'єкта вимірювання.

Також, з попередньої формули видно, що для збільшення чутливості необхідно збільшувати радіус сканування та чутливість частотного детектора.

2.4. ЛВС з частотною модуляцією одночасного контролю параметрів лінійних та кутових механічних коливань

По принципу побудови ЛВС одночасного контролю параметрів лінійних та кутових коливань можна розділити на дві групи: з роздільними каналами вимірювання кутових та лінійних коливань; зі суміщеними. Такі системи можна розглядати як одну з груп багатоканальних лазерних систем. В залежності від джерел та перетворювачів когерентного випромінювання, які використовуються, вони можуть працювати в двох режимах: одно частотному та двох частотному. Розглянемо основи роботи ЛВС першої групи.

Випромінювання лазера 1 (рис. 2.8), що проходить крізь електрооптичний перетворювач, який складається з двох чверть хвильових пластин 2, 5, електрооптичного кристала 3, формувача 4, ділиться світлоділним кубиком 6 на дві частини. Одна частина через поляризатор 9, дефлектор 10, нерухомі відбивачі 11, 20, направляється на об'єкт

вимірювання 19, який виконує кутові коливання. Радіус окружності сканування $r = L \operatorname{tg} \gamma$, де L – відстань від дефлектора до об'єкта; 2γ – кут при вершині конуса, що описується скануючим випромінюванням. Відбитий від об'єкта вимірювання 19 оптичний сигнал направляє на оптичну систему 21 під кутом $\gamma + 2\alpha \sin(\omega_1 t + \varphi)$ та суміщається за допомогою світлодільного кубика 22 з опорним оптичним сигналом, який пройшов світлодільний кубик 7, поляризатор 13, світлодільну пластину 8 та розширювач 23. Друга частина випромінювання джерела 1 ділиться ще на дві частини світлодільним кубиком 7. Вимірювальний оптичний сигнал, що пройшов поляризатор 12, нерухомий відбивач 11 та світлодільний кубик 14, направляє на об'єкт вимірювання 19 вимірювальним оптичним сигналом. Інформація про лінійні та кутові коливання об'єкта вимірювання 19 поступає через поляризатор 15, 24 на фотоприймачі 16, 25, вузько смугові фільтри 18, 26 та частотні детектори 27, 17.

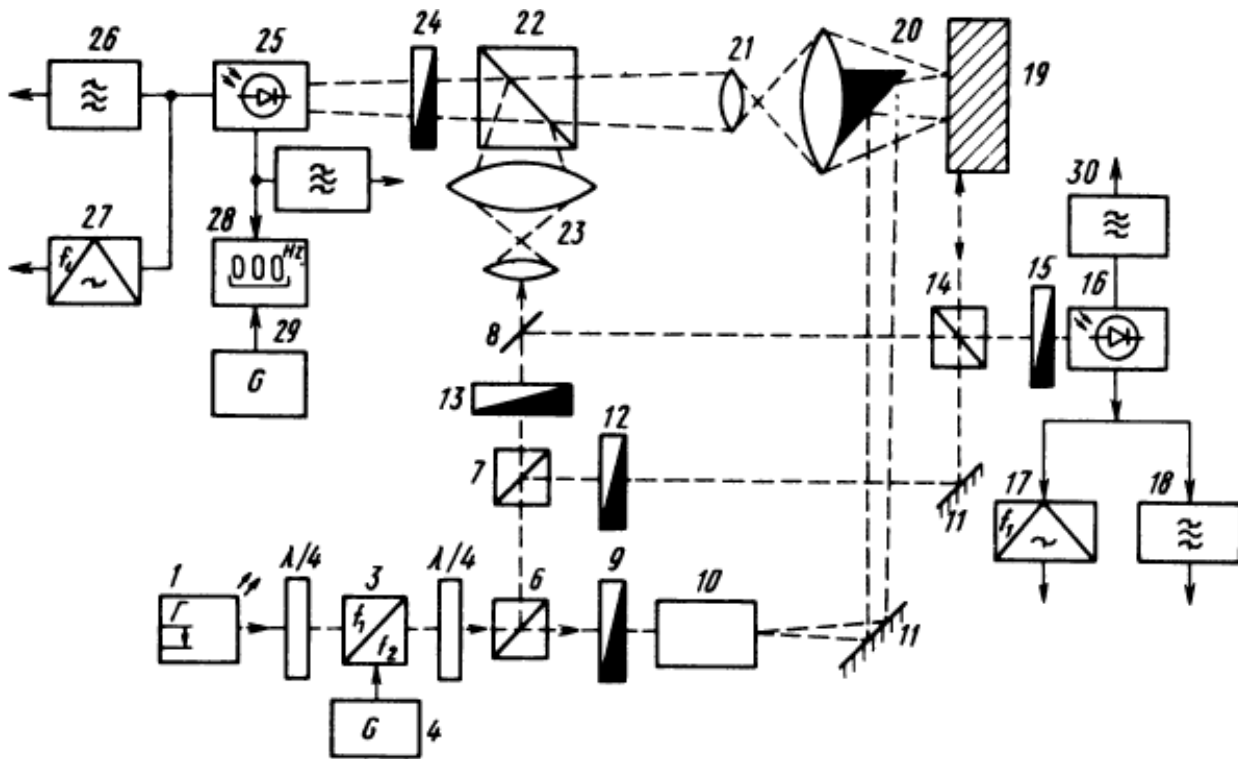


Рис. 2.9. Лазерна система з роздільними каналами вимірювання лінійних та кутових коливань

Матриця сукупності елементів, крізь які проходить випромінювання в опорному каналі, має вигляд :

$$\begin{aligned}
M_{\text{оп}} &= R_{24} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} R_{22} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{22} \end{vmatrix} \times \\
&\times R_{13} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_7 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_7 \end{vmatrix} R_6 \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_6 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \\ \sqrt{2} & \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega t & -j \sin \Omega t \\ j \sin \Omega t & 1 - j \cos \Omega t \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \\ \sqrt{2} & \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Цей вираз з урахуванням проходження когерентного випромінювання, що описується вектором E , прийме вигляд :

$$L_{\text{оп}} = E_0 \exp j\omega t \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix},$$

де $E_0 = ED_0$.

Матриця сукупності елементів, крізь які проходить випромінювання у вимірювальному плечі при вимірюванні кутових коливань, має вигляд :

$$\begin{aligned}
M_{\text{вим}} &= R_{24} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} R_{22} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_{19} \exp j \times \\
&\times \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} r \operatorname{tg} \alpha \sin \omega_1 t \right\} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{19} \end{vmatrix} \times \\
&\times R_{20} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{20} \end{vmatrix} R_{11} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{11} \end{vmatrix} \times \\
&\times R_{10} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \exp -\frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \end{vmatrix} R_9 \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_6 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \\ \sqrt{2} & \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega t & -j \sin \Omega t \\ j \sin \Omega t & 1 - j \cos \Omega t \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \\ \sqrt{2} & \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix},
\end{aligned}$$

де α_1 – кут падіння вимірювального оптичного сигналу на фотокатод, який має розмір квадрату зі стороною a .

Матриця з урахуванням проходження когерентного випромінювання прийме вигляд :

$$L_{\text{вим}} = E_1 \exp j \left[(\omega - \Omega)t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \right] \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix},$$

де $E_1 = ED_1$.

Сумарний вектор електричного поля на виході фотоприймача 25 буде мати вигляд :

$$L_{\Sigma} = E_0 \exp j \left\{ \omega t \right\} + E_1 \exp j \left\{ (\omega - \Omega)t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t - \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \alpha_1 \right\}$$

Сукупність елементів, крізь які проходить випромінювання у вимірювальному каналі при вимірюванні лінійних коливань, має вигляд матриці:

$$\begin{aligned} M_{\text{вим}} &= R_{15} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} R_{14} \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{14} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \times \\ &\times j \begin{vmatrix} R_{19} j \exp j \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt & 0 \\ 0 & -R_{19} j \exp j \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt \end{vmatrix} \times \\ &\times R_{14} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{14} \end{vmatrix} R_{12} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \times \\ &\times R_7 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_7 \end{vmatrix} R_6 \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_6 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \times \\ &\times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 - j \cos \Omega t & -j \sin \Omega t \\ j \sin \Omega t & 1 - j \cos \Omega t \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Сукупність елементів, крізь які проходить випромінювання в опорному каналі при вимірюванні лінійних коливань, має вигляд матриці:

$$\begin{aligned}
M_{\text{оп}} &= R_{15} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} R_{14} \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{14} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times R_{12} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} R_7 \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_7 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times R_6 \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_6 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega t & -j \sin \Omega t \\ j \sin \Omega t & 1 - j \cos \Omega t \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Сумарний вектор електричного поля на вході фотоприймача 16:

$$L_{\Sigma} = E_0 \exp j\omega t + E_2 \exp j \left\{ (\omega - \Omega)t + \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt \right\}$$

Вихідний сигнал фотоприймача 16 має в собі несучу частоту, яка промодульована частотою Доплера :

$$u_{\text{фп}} = U \cos \left(\Omega t + \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt \right)$$

Вихідний сигнал частотного детектора 17 буде мати вигляд :

$$u_{\text{чд}} = s_{\text{чд}} \frac{d \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt}{dt} Kx(t),$$

де $S_{\text{чд}}$ – коефіцієнт перетворення частотного детектора;

$$K = \frac{s_{\text{чд}} 4\pi}{\lambda},$$

Змінна складова вихідного сигналу фотоприймача 25 :

$$u = U \frac{\sin \frac{4\pi}{\lambda} \sin \alpha_1}{\frac{4\pi}{\lambda} \sin \alpha_1} \cos \left[\Omega t + \frac{4\pi r \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t \right],$$

де ω_1 – кутова частота сканування випромінювання; α_1 – кут падіння вимірювального оптичного сигналу на фотокатод, який має розмір квадрату зі стороною α .

З попереднього виразу слідує, що максимальне значення амплітуди має місце при:

$$\left(\sin \frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha_1\right) / \left(\frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha_1\right) = 1,$$

що відповідає $\alpha_1 = 0$.

За допомогою наступного виразу описується вихідний сигнал смугового фільтра 26, який налаштований на центральну частоту Ω :

$$u = U_0 J_0(m_f) \cos \Omega t,$$

де $J_0(m_f)$ – функція Бесселя нульового порядку аргументу m_{f0} .

Кутове зміщення об'єкта вимірювання має вигляд:

$$\alpha_m = \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{4\pi r} (m_f)_m,$$

де $(m_f)_m$ – значення індексу частотної модуляції, що відповідає кореням рівняння $J_0(m_f)_m = 0$.

Вхідний сигнал частотного детектора 27 представляє собою похідну від змінної фази вихідного сигналу фотоприймача 25:

$$u_{\text{чд}} = K \sin \omega_1 t,$$

Величина початкової фази φ_1 визначає азимут нахилу поверхні об'єкта вимірювання, яка вимірюється за допомогою фазометра шляхом порівняння фаз сигналів з виходу частотного детектора 27 та на управляючому вході дефлектора. При синусоїдному коливанні об'єкта вимірювання 19, вихідний сигнал вузько смугового фільтра 18 має вигляд :

$$u_{\text{фп}} = U J_0\left(\frac{4\pi S_0}{\lambda}\right) \cos \Omega t,$$

де $J_0(m_f)$ – функція Бесселя нульового порядку аргументу m_f .

По наступній формулі знаходимо амплітуди коливань об'єкта вимірювання, що відповідає нулям функції Бесселя нульового порядку :

$$S_0 = \left[\frac{4\pi S_0}{\lambda}\right]_m \frac{\lambda}{4\pi}$$

Використовуючи в ЛВС одно частотне джерело когерентного випромінювання без перетворювача, вона буде працювати в одно частотному режимі, тобто $\Omega = 0$. У цьому

випадку обробка вихідних сигналів фотоприймачів проводиться методом підрахунку імпульсів.

Вихідний сигнал фотоприймача 25 має вигляд :

$$u = K_{\text{фп}} U \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} r \operatorname{tg} \alpha \sin \omega_1 t + \gamma \right].$$

На виході фотоприймача число імпульсів, що реєструються за інтервал часу, який дорівнює періоду сканування, як слідує з формули :

$$N = 8r \operatorname{tg} \alpha / \lambda$$

при вимірюванні кута в секундах $\alpha'' = (N\lambda/r) 25,79$. При $t_u = 16296/r$;

$\alpha'' = N = 10^2$ вимірювання проводимо за допомогою частотоміра 28, який підключений до виходу фотоприймача 25, з генератором 29, що задає час підрахунку імпульсів.

Перша гармоніка вихідного сигналу вузько смугового фільтру 30 з центральною частотою ω_1 має вигляд :

$$u = U \sin \gamma J_1(m_f) \sin \omega_1 t.$$

Якщо $U \sin \gamma = \text{const}$ кутове зміщення об'єкта визначається формулою:

$$\alpha_m = \operatorname{arctg} \frac{\lambda (m_f)_m}{4\pi r}$$

де $(m_f)_m$ – значення індексу частотної модуляції, що відповідає кореням рівняння $J_1(m_f)_m = 0$.

Так само, при $\Omega = 0$ вихідний сигнал фотоприймача 16 має вигляд :

$$u_{\text{фп}} = U \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} V_{\text{ср}} + \frac{4\pi S_0}{\lambda} \sin \omega_0 t \right)$$

При синусоїдному коливанні об'єкта вимірювання вихідний сигнал вузько смугового фільтра, який налаштований на частоту ω_0 , має вигляд

$$u_{\text{уф}} = U \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta_0 J_1 \left(\frac{4\pi S_0}{\lambda} \right) \sin \omega_0 t ,$$

та при $U \cos (2\pi/\lambda) \delta_0 = \text{const}$ амплітуди коливань об'єкта вимірювання, які відповідають нулям функції Бесселя 1-го порядку, знаходяться по формулі :

$$S_0 = \left[\frac{4\pi S_0}{\lambda} \right]_m \frac{\lambda}{4\pi}.$$

Число імпульсів при обробці вихідного сигналу фотоприймача 16 методом підрахунку імпульсів на його виході буде дорівнювати:

$$N = 2m V_{cp} t/\lambda.$$

Під час зміни пікових значень швидкостей гармонічних коливань об'єкта вимірювання $N = 4V_{нік} t_n/\pi\lambda$, що відповідає часу підрахунку імпульсів

$$t_i = \pi\lambda 10^n/4, \text{ та для } \lambda = 0,6823 \text{ мкм } t_i = 0,495.$$

Друга група ЛВС приведена на рис. 2.9.

На першому виході лазера 9 випромінювання ділиться за допомогою світлодільної пластинки 42 на дві частини та проходить через два електрооптичних перетворювача частоти, які складаються з поляризаторів 10, 15, 44, 49, чверть хвильових пластинок 11, 14, 45, 48, електрооптичних кристалів 12, 47, які живляться формувачами 13, 46, та за допомогою світлодільних пластинок 17, 50, дзеркала 43 створює перший сумісний канал. В ньому випромінювання $\omega + \Omega_1$ крізь дефлектор 16 та нерухомий відбивач 19 направляється на об'єкт вимірювання 20, а випромінювання з частотою $\omega + \Omega_2$ за допомогою світло дільника 17 та нерухомого відбивача 19 суміщається з випромінюванням $\omega + \Omega_1$ і також направляється на об'єкт вимірювання 20 по осі x .

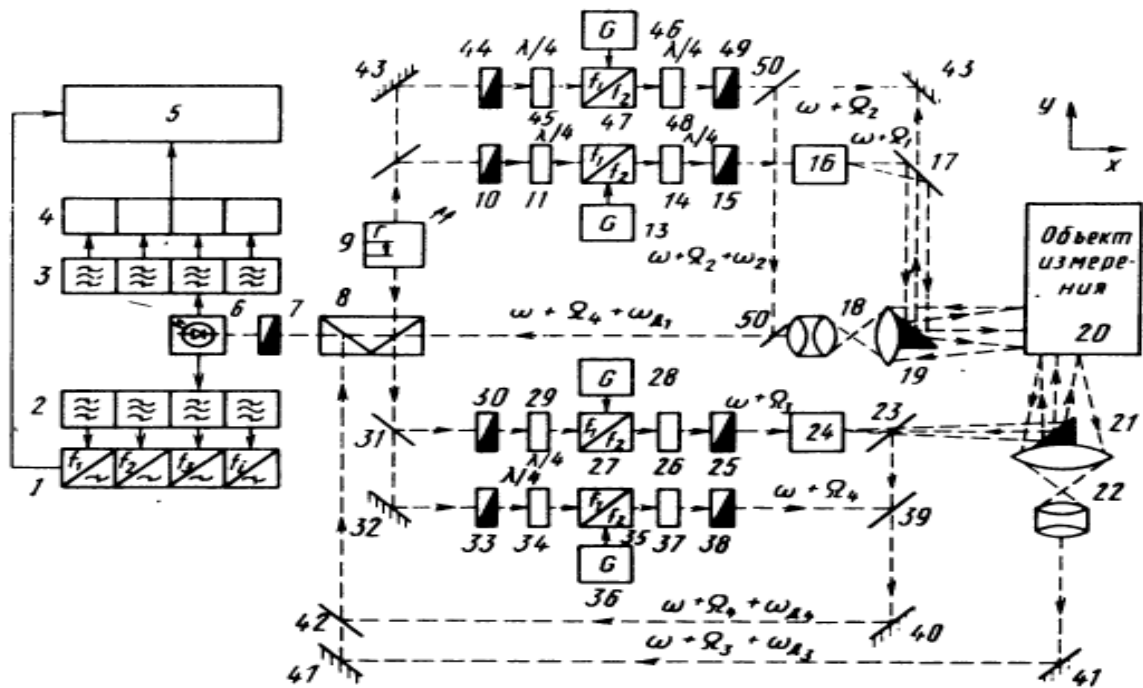


Рис. 2.10. Двох координатна лазерна система зі сумісними каналами вимірювання лінійних та кутових коливань

На другому виході лазера 9 випромінювання ділиться за допомогою світлодільної пластини 31 на дві частини і проходить крізь два електрооптичних перетворювача частоти, які складаються з поляроїдів 30, 33, 25, 38, чверть хвильових пластин 29, 34, 26, 37, електрооптичних кристалів 27, 35, що живляться формувачами 28, 36, та за допомогою світлодільних пластин 23, 39 і дзеркала 32 створюють другий суміщений канал.

Через нього випромінювання з частотою $\omega + \Omega_3$ крізь дефлектор 24 та нерухомий відбивач 21 направляється на об'єкт вимірювання 20, а випромінювання з частотою $\omega + \Omega_4$ за допомогою пластинок 39, 23, та відбивача 21 суміщається з випромінюванням частотою $\omega + \Omega_3$ і також направляється на об'єкт вимірювання по осі y .

Тут радіус окружності сканування випромінювання з частотами $\omega + \Omega_1$, $\omega + \Omega_3$, $r = L \operatorname{tg} \gamma$, де L – відстань від дефлектора до об'єкта вимірювання; γ – кут при вершині конуса, що описується скануючим променем.

Спочатку відбиті від об'єкта вимірювання оптичні сигнали з частотами $(\omega + \Omega_1 + \omega_{\partial 1})$, $(\omega + \Omega_2 + \omega_{\partial 2})$, $(\omega + \Omega_3 + \omega_{\partial 3})$, $(\omega + \Omega_4 + \omega_{\partial 4})$ через оптичні системи 18, 22,

світлодільні елементи 50, 17, 8, 23, 39, 42 та нерухомі дзеркала 40, 41, 42, 43 і поляризатор 7 направляються на фотоприймач 6, куди також направляється оптичний сигнал з частотою ω .

Після цього вихідний сигнал фотоприймача поступає на смугові фільтри 2, частотні детектори 1, вузько смугові фільтри 3, засоби фіксації нулів функції Бесселя 4 та блок електронної обробки 5.

Проводимо вимірювання одночасно по двом каналам у напрямку x та y . По кожному каналу одночасно проводимо контроль параметрів кутових та лінійних коливань.

За допомогою вузько смугової фільтрації проводимо розділення несучих частот $\omega + \Omega_1$, $\omega + \Omega_3$, які використовуються для вимірювання кутових коливань, та $\omega + \Omega_2$, $\omega + \Omega_4$, які застосовуються для вимірювання лінійних коливань. Девіація доплерівських частот $\omega_d(t)$ визначається величинами кутових та лінійних зміщень об'єкта, відношенням та значеннями несучих частот та параметрів вимірювальної системи. На виході частотних детекторів отримуємо аналоговий сигнал лінійних та кутових коливань по двом осям X та Y , а за допомогою вузько смугових фільтрів проводимо калібрування.

За наступний виразом можна описати вихідний сигнал вузько смугових фільтрів з центральними частотами Ω_1 та Ω_3 :

$$u = UJ_0(m_f) \cos \Omega t.$$

По наступній формулі можна знайти амплітуду кутових коливань:

$$\alpha_m = \arctg \frac{\lambda (m_f) m}{4 \pi r}$$

Можна визначити форму коливань за допомогою частотних детекторів 1. Похибка вимірювання амплітуд лінійних коливань $\leq 1 \%$, а кутових $\leq 3 \%$.

Всі ці дані дозволять в наступному розділі розглянути саме лазерні багатохвильові вимірювачі вібрацій.

РОЗДІЛ 3

ЛАЗЕРНІ БАГАТОХВИЛЬОВІ ВИМІРЮВАЧІ ВІБРАЦІЇ

3.1. Загальні відомості та принцип роботи

Трикомпонентний віброметр представляє собою лазерно-цифровий вимірювальний комплекс, який складається з:

- оптичних скануючих лазерних головок;
- модуля сканування геометрії;
- система управління.

В систему управління входять три управляючих модуля оптичних головок, блок сумісності управляючих модулів з комп'ютером та сам комп'ютер.

Оптичні головки представляють собою пристрої, в яких знаходяться гелій-неонові джерела лазерних променів та приймачі відбитого сигналу. Робота кожної оптичної головки та зв'язок з комп'ютером забезпечується управляючим модулем та блоком сумісності. У верхній оптичній головці додатково вмонтовані відеокамера та лазерний модуль сканування геометрії. Зображення з відеокамери передається в комп'ютер та відображається на моніторі. По цьому зображенню об'єкта виконується налаштування лазерів оптичних головок та задається сітка сканування. За допомогою лазерного модуля сканування геометрії визначаються відстані до поверхонь об'єкта та зміщення.

В процесі роботи лазерні промені всіх трьох оптичних головок синхронно сканують поверхню об'єкта у вузлових точках сітчастої області, при цьому послідовно переміщуючись з точки в точку. В процесі сканування фіксується здвиг частоти відбитого від віброуючої поверхні лазерного променю кожної з трьох оптичних головок та обчислюються миттєві значення віброшвидкості та віброприскорення.

Трикомпонентні лазерні системи, у відмінності від однокомпонентних, дозволяють визначити параметри вібрації об'єкта не тільки в напрямку осі оптичної головки, а і в довільному напрямку у просторі.

Кафедра авіоники

<i>Виконав</i>	Соляник Р.О.			Авіаційний лазерний вимірювач вібрацій	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Керівник</i>	Землянський В..					49	
<i>Консульт.</i>					173 «Авіоніка»		
<i>Н-контр.</i>	Левківський В.В.						
<i>Зав. каф.</i>	Грищенко Ю.В.						

Оскільки система являється безконтактною, то відпадає необхідність в установці датчиків та прокладанні кабелів. Вимірюється безпосередньо вібрація, що спостерігається. При цьому властивості поверхні не впливають на результати вимірювань, які, до того ж, з легкістю можуть виконуватись на великих відстанях.

При роботі система створює сітку точок вимірювань з просторовими координатами об'єкта, що забезпечується за допомогою модуля сканування геометрії. Послідовні наближення дозволяють отримати практично необмежену кількість точок вимірювань, тобто максимальну густину сітки.

Поєднуючи високу швидкість вимірювань та автоматизацію процесів, трикомпонентна лазерна віброметрія дозволяє скоротити затрати часу до 90 %.

Найбільш вдалим вибором типу лазера для вимірювальної головки являється *HeNe* з довжиною хвилі 633 Нм. Робочі відстані становлять від 0,35 м до 5 м при потужності випромінювання менше 1 мВт. При цьому розміри об'єкта вимірювання можуть бути як менші ніж 1 мм², так і більші ніж 2 м².

3.2. Контроль нерівномірності швидкості руху трикомпонентною лазерною системою

Розглянемо, як здійснюється контроль нерівномірності швидкості руху трикомпонентною лазерною системою з електрооптичним перетворювачем частот (рис. 3.1).

Одночастотне когерентне випромінювання джерела 1 після проходження світлодільного кубика, електрооптичних перетворювачів, які складаються з чвертьхвильових пластин 3, 5, 12, 14, 19, 21 та електрооптичних кристалів 4, 13, 20, перетворюється в три пари ортогональних складових з частотами $\omega - \Omega_1$, $\omega - \Omega_2$, $\omega - \Omega_3$ та ω .

Складові з частотами $\omega - \Omega_1$, $\omega - \Omega_2$, $\omega - \Omega_3$ за допомогою світлодільних кубиків 6, 16, 23, відбиваючих дзеркал 11, 17, 18, 24, крізь поляризатори 15, 22 та чвертьхвильову

пластину 9 направляються на вимірювальні плечі об'єкта вимірювання 10, а з частотою ω в опорне плече лазерної системи, на чвертьхвильову пластину 7 та відбиваюче дзеркало 8.

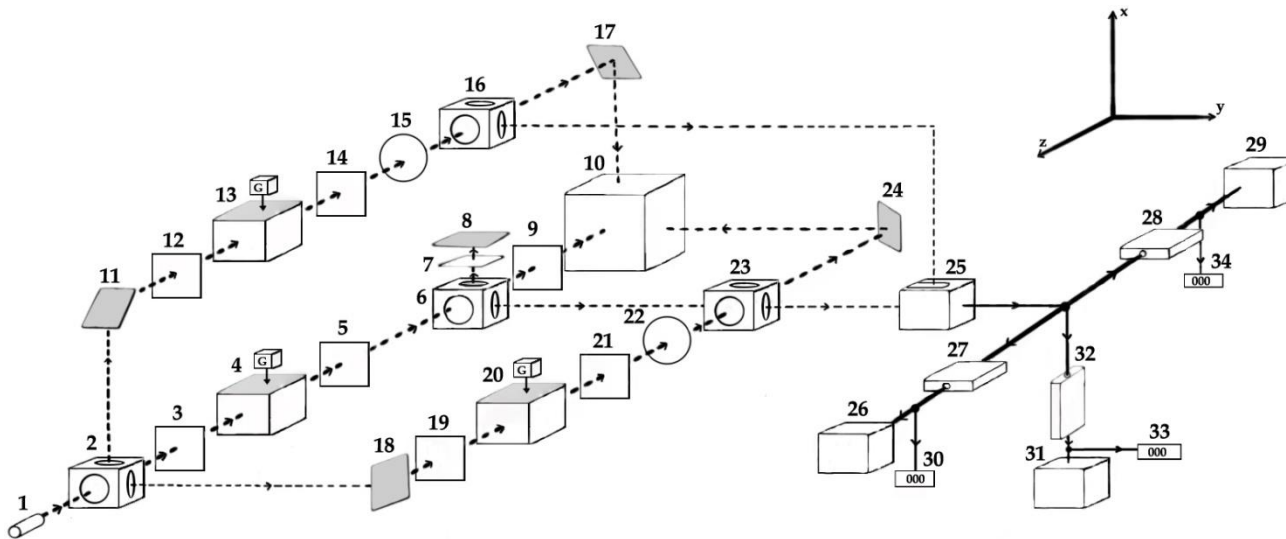


Рис. 3.1. Трикомпонентна лазерна система

На фотоприймач 25 поступають однаково поляризовані складові випромінювання з опорного та вимірювальних плечей системи. Вихідний сигнал фотоприймача направляється на смугові фільтри 27, 28, 32, і потім на частотні детектори 26, 29, 31. Інформацію про нерівномірність швидкості руху об'єкта дають частотоміри 30, 33 та 34.

Когерентне випромінювання *Eexpj ωt* проходить у вимірювальних плечах крізь елементи:

- по осі Z : 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 9, 6, 23;
- по осі Y : 2, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 10, 24, 23;
- по осі X : 2, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 10, 17, 16.

А в опорному плечі випромінювання проходить крізь елементи 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 7, 6, 23.

Матриці сукупності елементів, крізь які проходить випромінювання у вимірювальних плечах системи, мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
M_1 = & R_{23} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_6 \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_6 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_9 \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \times \\
& \times R_{10} \begin{vmatrix} \exp j \left\{ \int_0^t \frac{4\pi V_z}{\lambda} dt + \pi \right\} \operatorname{tg} \varphi_{10} & 0 \\ 0 & \exp \left\{ \int_0^t \frac{4\pi V_z}{\lambda} dt \right\} \end{vmatrix} \times \\
& \times R_9 \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_6 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
& \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega_1 t & -j \sin \Omega_1 t \\ j \sin \Omega_1 t & 1 - j \cos \Omega_1 t \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix} R_2 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_2 = & R_{23} \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{23} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_{10} \times \\
& \times \begin{vmatrix} \exp j \left\{ \int_0^t \frac{4\pi V_y}{\lambda} dt + \pi \right\} \operatorname{tg} \varphi_{10} & 0 \\ 0 & \exp \left\{ \int_0^t \frac{4\pi V_y}{\lambda} dt \right\} \end{vmatrix} \times \\
& \times R_{23} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} R_{22} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
& \times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega_2 t & -j \sin \Omega_2 t \\ j \sin \Omega_2 t & 1 - j \cos \Omega_2 t \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix} \times \\
& \times R_{18} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{18} \end{vmatrix} R_2 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_2 \end{vmatrix};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_3 &= R_{16} \begin{vmatrix} \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{16} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_{10} \times \\
&\times \begin{vmatrix} \exp j \left\{ \int_0^t \frac{4\pi V_x}{\lambda} dt + \pi \right\} \operatorname{tg} \varphi_{10} & 0 \\ 0 & \exp \left\{ \int_0^t \frac{4\pi V_x}{\lambda} dt \right\} \end{vmatrix} \times \\
&\times R_{16} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} R_{15} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega_2 t & -j \sin \Omega_2 t \\ j \sin \Omega_2 t & 1 - j \cos \Omega_2 t \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times R_{11} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_{11} \end{vmatrix} R_2 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_2 \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Матриця сукупності елементів, крізь які проходить випромінювання в опорному плечі системи, має вигляд :

$$\begin{aligned}
M_{\text{оп}} &= R_{23} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} R_6 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} R_8 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_8 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times R_6 \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \exp j\pi \operatorname{tg} \varphi_6 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{vmatrix} \times \\
&\times \begin{vmatrix} 1 + j \cos \Omega_1 t & -j \sin \Omega_1 t \\ j \sin \Omega_1 t & 1 - j \cos \Omega_1 t \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix} R_2 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Матриці M_1 , M_2 , M_3 , $M_{\text{оп}}$ з урахуванням проходження когерентного випромінювання приймуть вигляд:

$$L_1 = E_1 \exp j \left\{ (\omega - \Omega_1)t + \int_0^t \frac{4\pi V_z}{\lambda} dt \right\} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix},$$

$$L_2 = E_2 \exp j \left\{ (\omega - \Omega_2)t + \int_0^t \frac{4\pi V_y}{\lambda} dt \right\} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix},$$

$$L_3 = E_3 \exp j \left\{ (\omega - \Omega_3)t + \int_0^t \frac{4\pi V_x}{\lambda} dt \right\} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix};$$

$$L_{оп} = E_0 \exp j \omega t \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Інтенсивність випромінювання на вході фотоприймача:

$$W = (1/2\pi) R_E [(L_1 + L_2 + L_3 + L_{оп})(L_1 + L_2 + L_3 + L_{оп})^*].$$

Вихідний сигнал фотоприймача має в собі набір спектральних складових з несучими та комбінаційними частотами. Корисні спектральні складові, які несуть інформацію про нерівномірність швидкості руху по осям x , y та z , виділяються за допомогою смугових фільтрів 27, 28, 32.

Ширину смуги пропускання смугових фільтрів обираємо, виходячи з величин швидкостей руху об'єкта вимірювання та співвідношення між несучими частотами Ω_1 та Ω_2 .

При рівномірній швидкості руху на виході смугових фільтрів будемо мати періодичні сигнали з частотами $\Omega_1 + (4\pi/\lambda)V_z$, $\Omega_2 + (4\pi/\lambda)V_y$, $\Omega_3 + (4\pi/\lambda)V_x$. При зміні швидкості руху об'єкта будуть змінюватись доплерівські здвиги, що відповідає зміні напруги на виході частотних детекторів.

На рис. 3.2. приведені діапазони вимірювальних швидкостей нерівномірності швидкості руху об'єкта в залежності від швидкості його руху, співвідношення несучих частот та смуги пропускання частотних детекторів.

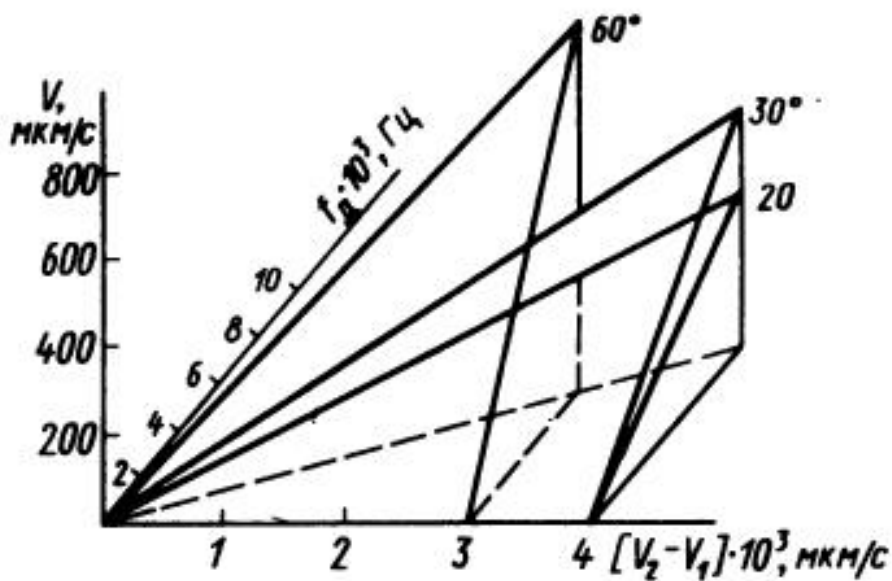


Рис. 3.2. Діапазони вимірювальних швидкостей нерівномірності руху об'єкта

3.3. Аналіз похибок вимірювання амплітуд гармонічних коливань з каналом зі здвигом частоти з вузько смуговою фільтрацією

При проведенні аналізу статичної похибки каналу зі здвигом частоти з вузько смуговою фільтрацією, який призначений для вимірювання амплітуд гармонічних коливань об'єкта, можна зазначити, що найбільш вірогідними джерелами статичної похибки являються фактори, що впливають на точність фіксації нулів функції Бесселя. Один з таких факторів – відхилення напруги на електрооптичному кристалі.

Відхилення напруги на електрооптичному кристалі від чверть хвильового запізнення призведе до наступного вигляду вихідного сигналу фотоприймача:

$$u(t) = U \cos \Delta\delta \cos \left(\Omega t + \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt \right),$$

де $\Delta\delta$ – відхилення фазового здвигу від чверть хвильового запізнення в кристалі.

Враховуємо, що:

$$\frac{2\pi l}{\lambda d} n_0^3 r_{22} U_0 \sqrt{\xi_x^2 \sin^2 \Omega t + \xi_y^2 \cos^2 (\Omega t + \varphi)} = \delta + \Delta\delta;$$

$$\frac{2\pi l}{\lambda d} n_0^3 r_{22} U_0 = \delta;$$

$$\Delta\delta = \frac{2\pi l}{\lambda d} n_0^3 r_{22} [U_0 \sqrt{\xi_x^2 \sin^2 \Omega t + \xi_y^2 \cos^2 (\Omega t + \varphi)} - U_0],$$

де $\xi_x = U_x/U_0$, $\xi_y = U_y/U_0$, U_0 – напруга, необхідна для створення на пів хвильового або чверть хвильового запізнення в кристалі; φ – додатковий фазовий зсув.

Також вірогідними джерелами статичної похибки, які впливають на точність фіксації нулів функції Бесселя, являються: зміщення опорного та вимірювального оптичних сигналів відносно центра фотокатода x_0 ;

- кут між суміщеними оптичними сигналами γ ;
- стабільність довжини хвилі джерела випромінювання λ . Зміна x_0 та γ виникають в основному через неточності юстировки приладу, а зміна λ зв'язано з стабільністю роботи джерела випромінювання.

Сигнал на виході вузько смугового фільтра з урахуванням факторів, які впливають на точність фіксації нулів функції Бесселя, матиме вигляд:

$$u(t) = U_{y\phi} = J_0 \left(\frac{4\pi S_0}{\lambda} \right) \cos \Omega t,$$

Статична похибка в цьому випадку матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
\Delta U_{y\phi} &= \frac{\partial U_{y\phi}}{\partial x_0} \Delta x_0 + \frac{\partial U_{y\phi}}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial U_{y\phi}}{\partial \gamma} \Delta \gamma + \\
&+ \frac{\partial U_{y\phi}}{\partial \xi_x} \Delta \xi_x + \frac{\partial U_{y\phi}}{\partial \xi_y} \Delta \xi_y + \frac{\partial U_{y\phi}}{\partial \varphi} \Delta \varphi; \\
\Delta U_{y\phi} &= H \exp - L \cos CD \left[- 2 \frac{x_0}{r^2} \exp - \left\{ \frac{x_0}{r^2} \right\} \right] \Delta x + \\
&+ H \exp \left\{ - \left(\frac{x_0}{r} \right)^2 \right\} \cos CD \left[- 4\pi^2 \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \gamma \exp - L \right] \Delta \gamma + \\
&+ H \exp - \left(\frac{x_0}{r} \right)^2 \exp - L \left[- \sin \frac{2\pi l}{\lambda d} D \right] \times \\
&\times \frac{K U_0 \xi_x \sin^2 \Omega t}{\sqrt{\xi_x^2 \sin^2 \Omega t + \xi_y^2 \cos^2 (\Omega t + \varphi)}} \Delta \xi_x + H \exp - \\
&- \left(\frac{x_0}{r} \right)^2 \exp - L \left[- \sin \frac{2\pi l}{\lambda d} \right] \frac{K U_0 \xi_y \cos^2 (\Omega t + \varphi)}{\sqrt{\xi_x^2 \sin^2 \Omega t + \xi_y^2 \cos^2 (\Omega t + \varphi)}} \Delta \xi_y + \\
&+ H \exp - \left(\frac{x_0}{r} \right)^2 \exp - L \left[- \sin \frac{2\pi l}{\lambda d} D \right] \times \\
&\times \frac{K U_0 \xi_y^2 \sin 2 (\Omega t + \varphi)}{\sqrt{\xi_x^2 \sin^2 \Omega t + \xi_y^2 \cos^2 (\Omega t + \varphi)}} \Delta \varphi + H \exp - \left(\frac{x_0}{r} \right)^2 \times \\
&\times \left\{ \exp - L \right\} \left[- \sin \frac{2\pi l}{\lambda^2 d} n_0^3 r_{22} D \right] + \cos CD \left[\exp - L \frac{4\pi^2 r^2 \gamma^2}{\lambda^3} \right] \Delta \lambda.
\end{aligned}$$

Величина мінімуму амплітуди вихідного електричного сигналу вузько смугового фільтра, що фіксується реєструючим приладом, не повинна бути менше величини ΔU_{ϕ} .

Тепер розглянемо вплив несинусоїдності коливань об'єкта вимірювання на роботу каналу зі здвигом частоти. Вихідний сигнал фотоприймача при спотвореннях коливань об'єкта вимірювання, що визначається двома гармонічними складовими, має вигляд :

$$u(t) = U \cos [\Omega t + m_{f_0} \sin (\omega_0 t + \varphi_0) + m_{f_1} \sin (\omega_1 t + \varphi_1)];$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_0.$$

Сигнал на виході вузько смугового фільтра, який налаштовано на частоту Ω , визначимо за допомогою виразу:

$$u(t) = K_{y\Phi} U \left\{ [J_0(m_{f_0})J_0(m_{f_1}) + \right.$$

$$+ 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(m_{f_1})J_{4k}(m_{f_0}) \cos 2k\varphi] \cos \Omega t +$$

$$\left. + [2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k-1}(m_{f_1})J_{4k-2}(m_{f_0}) \sin (2k-1)\varphi] \sin \Omega t \right\}$$

При значеннях $\varphi = 0$ амплітуда вихідного сигналу вузько смугового фільтра пропорційна виразу:

$$J_0(m_{f_0})J_0(m_{f_1}) + 2J_2(m_{f_1})J_4(m_{f_0});$$

при значеннях $\varphi = \pi/2$

$$\left\{ J_0^2(m_{f_0})J_2^2(m_{f_1}) - 4J_0(m_{f_0})J_0(m_{f_1}) \times \right.$$

$$\times J_2(m_{f_1})J_4(m_{f_0}) + 4J_1^2(m_{f_1})J_2^2(m_{f_0}) +$$

$$\left. + 4J_2^2(m_{f_1})J_4^2(m_{f_0}) \right\}^{1/2}.$$

У попередньому виразі видно, що амплітуда вихідного сигналу фотоприймача не перетворюється в нуль при будь-яких значеннях m_{f_0} , а її відхилення від нуля визначається величиною S_I та значенням індексу частотної модуляції, пропорційного другій гармоніці.

З попереднього виразу також слідує, що похибка вимірювання нулів функції Бесселя зростає зі збільшенням номеру та амплітуди гармонічних складових коливань об'єкта вимірювання, і вона значно менша величини спотворень коливань об'єкта вимірювання.

Наприклад, при другій гармоніці коливання об'єкта вимірювання, яка складає 10 % від основної, похибка визначення першого нуля функції Бесселя складає 0,3 %, другого також 0,3 %, третього 0,44 % і т.д.

3.4. Аналіз похибки вимірювання амплітуд гармонічних коливань з одночастотним каналом з вузькосмуговою фільтрацією

При зміні амплітуд гармонічних коливань одно частотним каналом з вузько смуговою фільтрацією вихідний сигнал вузько смугового фільтра, налаштованого на частоту коливань об'єкта вимірювання ω_0 , описується виразом :

$$u(t) = 2K_{\text{фп}}K_{\text{уф}}E_1E_2 \exp - \left(\frac{x_0}{r}\right)^2 \times \\ \times \exp \left\{ - 2\pi^2 \left(\frac{r_0}{\lambda}\right)^2 \gamma^2 \right\} \cos \frac{2\pi\delta_0}{\lambda} J_1 \left(\frac{4\pi s_0}{\lambda}\right) \cos \omega t.$$

Основні джерела статичної похибки – це зміни: x_0 , γ , що виникають в основному через неточну юстировку системи, та δ_0 , що визначається коливаннями температури.

В такому випадку статична похибка розраховується за формулою :

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial x_0} \Delta x_0 + \frac{\partial U}{\partial \gamma} \Delta \gamma + \frac{\partial U}{\partial \delta_0} \Delta \delta_0 + \frac{\partial U}{\partial \delta_0} \frac{\partial \delta_0}{\partial t} \Delta t^*$$

При зміні δ_0 від температури, яка відбувається лінійно :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t^*} = (\delta_0 \pm \Delta \delta_0) \Delta \alpha.$$

Основним джерелом похибки являється зміна початкової оптичної різниці ходу δ_0 . Відхилення δ_0 під впливом теплових деформацій вузлів призводять до зміни амплітуди основної гармоніки вихідного сигналу фотоприймача. Для виключення цього впливу вимірювання слід проводити при максимальній чутливості ЛВС, чого можна досягти двома способами: плавним переміщенням опорного дзеркала відносно початкового положення; подачі напруги на п'єзокераміку, на яку наклеюють опорне дзеркало. Вірогідним джерелом похибки може буде недостатня жорсткість системи, тобто наявність власних резонансів в діапазоні, близькому до робочого. По цій причині не можна застосовувати у конструкції лазерних систем консольні елементи. Одно частотні канали з вузько смуговою фільтрацією можна використовувати для вимірювання тільки

амплітуд гармонічних коливань. В дійсності, вимірювальні коливання не являються строго синусоїдними. Як правило, ці спотворення не перевищують 5 %.

При вивченні впливу несинусоїдності вхідного впливу на похибку показань різних вимірювальних приладів, виявилось, що визначенні деяких функціоналів різні спотворення вхідного сигналу по різному впливають на результат вимірювання. Однак, в більшості випадків, зміна показань приладів значно менша наявного коефіцієнта нелінійних спотворень.

Також треба мати на увазі, що спотворення коливань об'єкта вимірювання в значній мірі визначаються однією з вищих гармонічних складових. Регулювання чутливості одно частотного каналу дозволяє зменшити систематичну похибку через несинусоїдальність коливань об'єкта вимірювання до дуже малих значень.

3.5. Аналіз похибки вимірювання параметрів механічних коливань складної форми каналом зі здвигом частоти

Джерела похибки при вимірюванні параметрів механічних коливань складної форми визначаються роботою фотоприймача, частотного детектора, а також впливом середовища, крізь яке проходить випромінювання, просторовою структурою опорного та вимірювального оптичних сигналів, а також точністю юстировки та налаштування.

Проаналізуємо проходження частотно-модульованого коливання крізь канал зі здвигом частоти випромінювання, фотоприймач, вважаючи його лінійною ланкою першого порядку, частотний детектор, а також вплив середовища розповсюдження випромінювання, точності юстировки та налаштування лазерних систем.

Структурна схема каналу зі здвигом частоти представлено на рис.3.3.

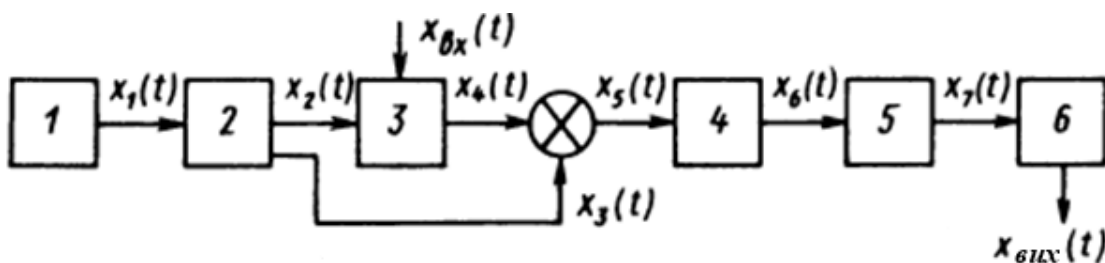


Рис. 3.3. Структурна схема каналу зі здвигом частоти :

1 – джерело випромінювання; 2 – електрооптичний перетворювач; 3 – об’єкт вимірювання; 4 – перетворювач; 5 – фотоприймач; 6 – ЧД

З цього слідує, що :

$$x_1(t) = E_1 \cos \omega t; \quad x_2(t) = E_2 \cos \omega t;$$

$$x_3(t) = E_3 \cos(\omega - \Omega)t; \quad x_4(t) = E_4 \cos \left[\omega t + \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt \right];$$

$$x_5(t) = E_0(t) \cos [\omega_1 t + \psi_1(t)];$$

$$E_0(t) = E_0^2 + E_1^2 + 2E_3E_1 \cos \left[\Omega t + \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt \right];$$

$$x_6(t) = 2E_3E_4 \cos \left[\Omega t + \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt \right];$$

$$2E_3E_4 = E_0.$$

Фотоприймач робить перетворення, які можна записати у вигляді :

$$\tau \frac{dx_7}{dt} + x_7(t) = E_0 \cos \left(\Omega t + \int_0^t \frac{4\pi x(t)}{\lambda} dt \right)$$

Рівняння для знаходження $E(t)$, $\delta(t)$, мають наступний вигляд :

$$\left. \begin{aligned} \tau \frac{dE(t)}{dt} &= -E(t) \pm \sqrt{E_0^2 - \tau^2 E^2(t) \left[\Omega + \frac{4\pi}{\lambda} (x(t) + \delta(t)) \right]^2}; \\ \frac{4\pi}{\lambda} \delta(t) + \psi'(t) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Вважаємо, що $E(t)$ – амплітуда, що повільно змінюється, тоді :

$$E(t) = \sqrt{E_0^2 - \tau^2 E^2(t) \left[\Omega + \frac{4\pi}{\lambda} (x(t) + \delta(t)) \right]^2}$$

А також :

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{\delta(t)}{\tau} - \frac{dx(t)}{dt} \quad \text{або} \quad \tau \frac{d\delta(t)}{dt} + \delta(t) = -\tau \frac{dx(t)}{dt}$$

Для цього рівняння :

$$|\delta(t)| \leq \tau_{\max} \left| \frac{dx(t)}{dt} \right|$$

Так, наприклад, для $\max dx(t)/dt = 10$ м/с, $t = 10^{-6}$ с, $|\delta(t)| \leq 10^{-5}$ м/с.

А для $\max dx(t)/dt = 100$ м/с, $|\delta(t)| \leq 10^{-4}$ м/с.

При розгляданні фотоприймача, як лінійну ланку першого порядку, можна сказати, що вихідний сигнал фотоприймача має складну структуру. Інерційність фотоприймача, яка визначається часом t , накладає обмеження на спектр вхідного періодичного сигналу, звужуючи при цьому діапазон вимірювань. Крім того, вихідний сигнал фотоприймача має паразитну модуляцію по амплітуді, яка може створюватись від просторової структури опорного та вимірювального оптичних сигналів, середовищем розповсюдження випромінювання, та іншими факторами.

Лазерне випромінювання, яке проходить крізь турбулентне середовище, призводить до зміни напрямку розповсюдження випромінювання, кута падіння випромінювання на фотоприймач, порушення когерентності, тобто до зміни наступних параметрів: зміщенню опорного та вимірювального оптичних сигналів відносно центра фотокатода $x_0(t)$; зміни перетину радіуса випромінювання $r_0(t)$; зміни кута падіння між опорним та вимірювальним оптичними сигналами при фото зміщенні $\gamma_0(t)$, появі m та n типів коливань.

Використавши для обробки вихідного сигналу фотоприймача частотний детектор, зменшити паразитну модуляцію по амплітуді можна за допомогою амплітудного обмежувача.

Сильний вплив на роботу ЛВС оказують паразитні спектральні складові у вихідному сигналі фотоприймача, які проявляються при зміні режиму генерації лазера, при порушенні роботи електрооптичних перетворювачів і т.д.

Однак, використовуючи частотний детектор або електричний фільтр з верхньою полоскою пропускання меншою ніж Ω_p , можна зменшити $\Delta U_{\text{чд}}$, яка створена паразитними складовими у вихідному сигналі фотоприймача, до дуже малої величини. У цьому випадку наявність паразитних типів коливань в оптичних

сигналах значно спрощує налаштування двох частотних лазерних систем при незначному зменшенні інтенсивності сигналу на різницеvй частоті.

3.6. Особливості метрологічної атестації

ЛВС особливі тим, що в них порівняння вимірюваного параметра проводиться з довжиною хвилі випромінювання лазера. Він має нестабільність частоти випромінювання близько $2 \cdot 10^{-8}$, що дозволяє приблизити точність робочих приладів до точності зразкових та різко підвищить продуктивність вимірювань.

Багато частотні ЛВС призначені для вимірювання параметрів механічних коливань, отримання електричного сигналу, який пропорційний по формі механічним коливанням об'єкта вимірювання, та проведення спектрального аналізу механічних коливань складної форми об'єкта вимірювання.

Сигнал на виході фотоприймачів двох частотних ЛВС при вимірюванні малих амплітуд механічних коливань обробляється за допомогою вузько смугової фільтрації.

Експериментальний аналіз похибки вимірювання амплітуд механічних коливань із застосуванням вузько смугового фільтра проводиться по наступній методиці.

Амплітуда несучої частоти, яка виділяється вузько смуговим фільтром, що налаштований на цю частоту, має вигляд :

$$U = U_{max} J_0(4\pi S_0/\lambda),$$

де U – значення напруги, які отримані за допомогою вольтметра, що вимірює напругу на виході вузько смугового фільтра; U_{max} – максимальне значення показань вольтметра, який вимірює напругу на виході вузько смугового фільтра.

Наступним чином можна провести вимірювання. На вихід вузько смугового фільтра підключається вольтметр, за допомогою якого вимірюється максимальна напруга на виході вузько смугового фільтра U_{max} та значення напруги U , яка відповідає першому нулю функції Бесселя.

На рис. 3.2 приведена гістограма визначення результатів вимірювання функції $J_0(4\pi S_0/\lambda)$.

При вимірюванні змінної напруги на виході вузько смугового фільтра неможливо визначити знак відхилення вимірюваної величини від нуля, тому отримані значення функції Бесселя нульового порядку, представлені на гістограмі, мають тільки додатній знак. Проте очевидно, що значення $J_0(4\pi S_0/\lambda)$ можуть бути також від'ємними. При цьому середньоквадратична похибка рівна 0,003.

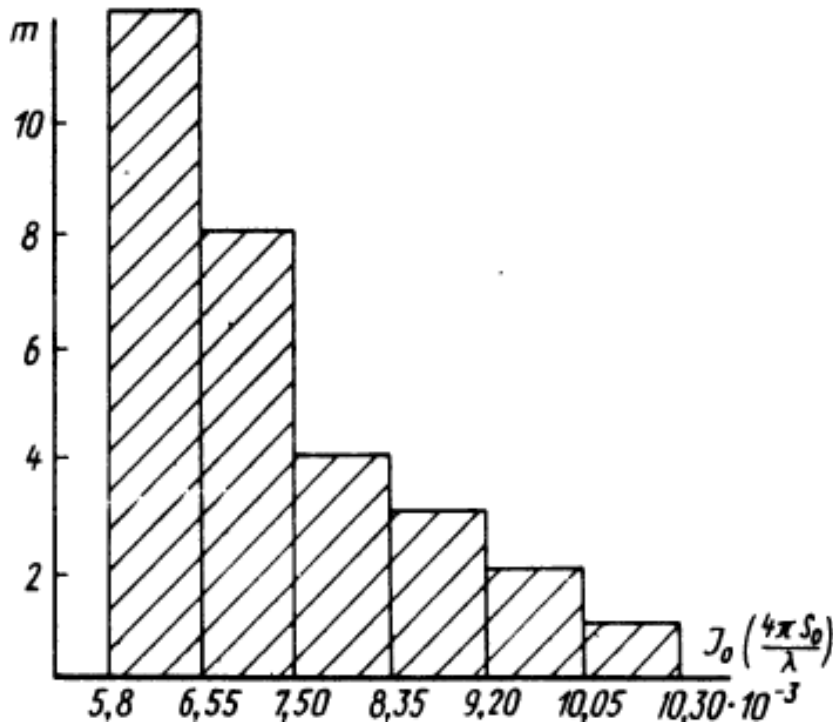


Рис. 3.4. Гістограма розподілення результатів вимірювання функції $J_0(4\pi S_0/\lambda)$

Критерієм відповідності параметрів розсіювання результатів вимірювань нормальному закону розподілення являється критерій Пірсона. На рис. 3.5 наведені теоретична 1 та емпірична 2 частоти розподілень.

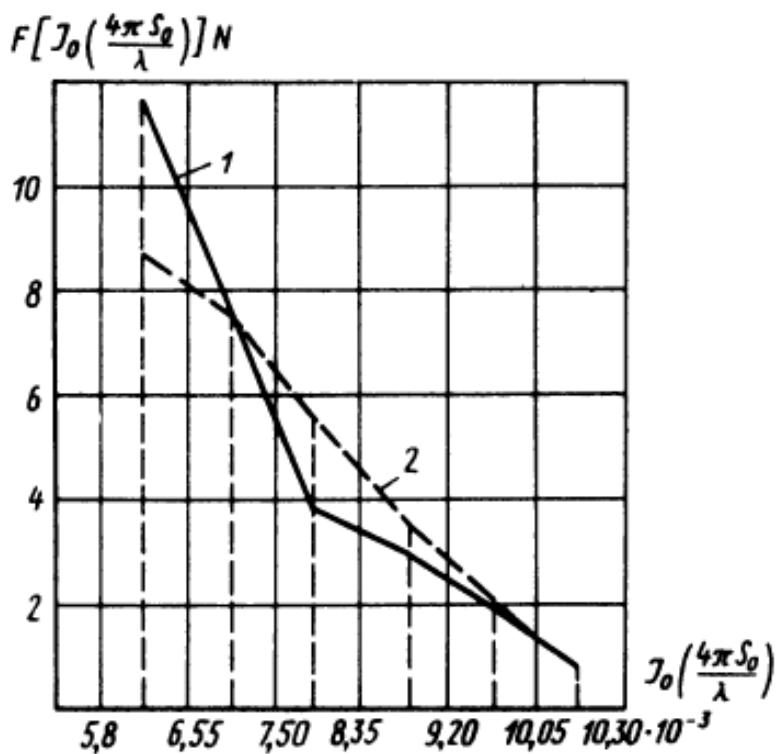


Рис. 3.5. Гістограма частоти розподілення

Значення χ^2 , яке отримали, рівне 1,819 та лежить в області значень, які відповідають наявності трьох степенів свободи та 95 % значимості, і тому можна вважати, що припущення про нормальний закон розподілення не суперечить результатам вимірювань. Середньоквадратична похибка рівна $\sigma = 0,003$. Гранична похибка визначення функції Бесселя нульового порядку $J_0(4\pi S_0/\lambda)$ приймаємо рівною 2,5. При цьому $\sigma = 0,0015$ з вірогідністю 98,75 %.

Гранична похибка вимірювання амплітуди коливання платформи об'єкта вимірювання на першому нулі функції Бесселя не перевищує 0,001 мкм. В цьому випадку відносна похибка вимірювання не перевищує 0,5 %.

Автоматична реєстрація нулів функції Бесселя підраховує нулі за допомогою засобу реєстрації, який наведено на рис. 3.6.

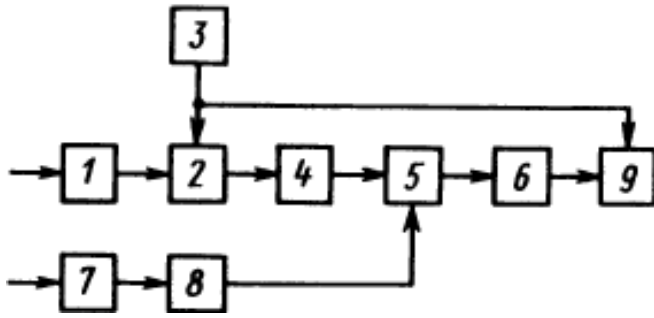


Рис. 3.6. Засіб реєстрації нулів функції Бесселя

Він складається з підсилювача-обмежувача 1, нуль-індикатора 2 із засобом регулювання величини гістерезису 3, формувача імпульсів 4, реверсивного лічильника 5, кодувального пристрою 6, пік-індикатора 7, управляючого тригера 8 та пристрою індикації 9.

Електричний сигнал з виходу вузько смугового фільтра випрямляється, підсилюється за допомогою вузько смугового підсилювача та обмежується на рівні, який не визиває перенавантаження нуль-індикатора.

Нуль індикатор складається з двох компараторів, у яких пороги спрацьовування плавно регулюються від нуля до максимальної напруги спрацьовування компараторів, що побудовані на базі операційного підсилювача. Для надійного спрацьовування реверсивного лічильника вихідна напруга компаратора обмежується. Імпульси, які сигналізують про момент переходу через нуль-функції Бесселя, поступають на формувач імпульсів і далі на 6-розрядний реверсивний лічильник.

Керування реверсивним лічильником здійснюється пік-індикатором та тригером управління таким чином, що при збільшенні амплітуди механічних коливань об'єкта вимірювання реверсивний лічильник працює в режимі підсумовування, а при зменшенні – в режимі віднімання. Вихідний код реверсивного лічильника поступає на кодувальний пристрій, який складається з двох ступенів дешифратора та шифратора. Перша ступінь дешифратора виконана у вигляді лінійного дешифратора, а друга – у вигляді матричного дешифратора. Шифратор побудований на логічних елементах ІЛІ, входи яких об'єднанні з виходами дешифратора таким чином, що б кожному імпульсу, який

поступає на вхід лічильника, відповідає відповідний код 4-розрядного десяткового числа, що відповідає вимірюваній амплітуді механічних коливань об'єкта вимірювання.

В засіб індикації входять ключові елементи, які виконані на високовольтних транзисторах, та газорозрядні індикатори ІН-8, за допомогою яких відбувається індикація десяткових чисел.

Індикація амплітуд механічних коливань відбувається тільки в тому випадку, якщо значення вихідного сигналу фотоприймача, які відповідають діапазону переходу через нуль-функції Бесселя, знаходяться в межах гістерезису нуль-індикатора. Увімкнення індикації проводиться по мережі анодного живлення індикаторів за допомогою ключа, який побудований на транзисторах.

Похибка вимірювання амплітуд механічних коливань визначається в основному точністю фіксації нулів функції Бесселя. На точність фіксації нулів впливають фактори, які змінюють амплітуду напруги електричного сигналу на виході вузько смугового фільтра. Як показали результати, величина цієї амплітуди лежить в межах 200 мВ. Відносна похибка вимірювання амплітуди механічних коливань в діапазоні 0,1 – 10 мкм не перевищує 1,5 %.

Експериментальне визначення амплітуди механічних коливань методом, який оснований на зміні індексу частотної модуляції, здійснюється ЛВС при заміні дзеркал в опорному каналі на додатковий об'єкт вимірювання. Вихідний сигнал фотоприймачів в цьому випадку обробляється за допомогою вузько смугової фільтрації.

Експериментальний аналіз похибки вимірювання амплітуд механічних коливань ЛВС, в яких реалізовані методи вимірювання зі зміною індексу частотної модуляції та використанням вузько смугової фільтрації, проводиться по наступній методиці.

Амплітуда механічних коливань являється функцією двох величин m_f та ψ :

$$m_{f_1} = \frac{4\pi S_0}{\lambda} (1 - \cos \psi), \quad m_{f_2} = \frac{4\pi S_0}{\lambda} 2 \sin \frac{\psi}{2}$$

Схема проведення експерименту по визначенню амплітуд механічних коливань, яка реалізує метод вимірювання зі зміною індексу частотної модуляції, приведено на рис. 3.7.

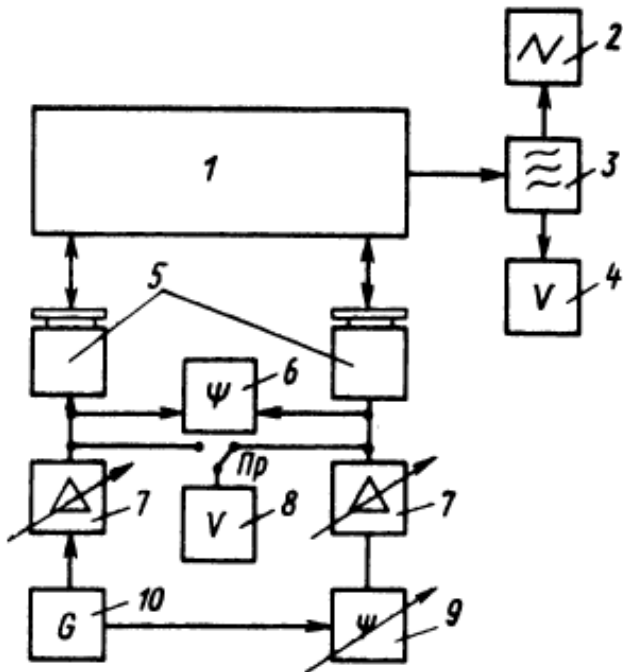


Рис. 3.7. Схема проведення експерименту по вивченню методу вимірювання із змінним індексом частотної модуляції: 1 – оптична частина ЛВС; 2 – осцилограф; 3 – вузько смуговий фільтр; 4, 8 – вольтметри; 5 – об’єкти вимірювань; 6 фото вимірювальний пристрій; 7 – підсилювачі; 9 – фазообертач; 10 – генератор

Експериментальне вимірювання напруги на виході вузько смугового фільтра в залежності від величини живлячої напруги об’єктів вимірювання та фазового кута між ними проводились для режиму вимірювання : $f = 300$ Гц, $U_1 = 37,8$ В, $U_2 = 37,7$ В, $\psi = 73,7$ градусів.

Отримане значення $\chi^2 = 6,13$ лежить в межах величин, які відповідають наявності трьох степенів свободи та 95 % значимості. Тому можна вважати, що гіпотеза про нормальний закон розподілення не суперечить результатам вимірювань.

Середньоквадратична похибка $U_{max} = 39,788$ В складає $\sigma_{U_{max}} = 0,0627$ В.

Результати вимірювань середньоквадратичної похибки показують, що відносна похибка вимірювання лежить в межах 2 – 4 %.

Отже, лазерний віброметр призначений в першу чергу для дистанційного вимірювання віброшвидкості об'єкта, що досліджується, або його частини в межах від 0,01 до 50 мм/с на віброчастотах від 80 Гц до 11 кГц з можливістю розширення діапазону віброчастот у бік низьких частот до 10 Гц. Вимірювальна дистанція від лазерного віброметра до об'єкта, що випробувається, становить від 1,5 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 зсуві 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 двопрменевої інтерференційної оптичної схеми з подальшим формуванням квадратурних компонентів електричного сигналу фотодетекторами балансного типу. Мікропроцесори, що входять до складу лазерного віброметра, роблять 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 дисплеї.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Лазер - це пристрій, який випромінює видиме світло - спектр енергії когерентного електромагнітного випромінювання в діапазоні від ультракороткого ультрафіолетового до наддовгого інфрачервоного (субміліметрове) випромінювання.

Всі лазери складаються з трьох основних структурних одиниць:

- Активне (робоче) середовище, що визначає можливу довжину хвилі випромінювання.
- Джерело енергії (насоси). Наприклад електричний струм, імпульсна лампа або хімічна реакція.
- Резонансна камера (оптичний резонатор) з ємнісним пристроєм - зазвичай два дзеркала.

Робота з лазерами небезпечна, тому працювати з ними необхідно дотримання заходів безпеки.

Відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 12.1.040-83* («Система стандартів охорони праці. Лазерна безпека. Загальні положення») за ступенем небезпеки випромінювання, що створюється лазером (лазерні установки) поділяються на 4 класи безпеки:

Клас 1. Лазери класу 1 вважаються «безпечними для очей». Серед них більшість лазерів, повністю ізольованих від людини. Лазери класу 1 не вимагають заходів безпеки.

Клас 2. Клас 2 включає лазери видимого випромінювання. Випромінювання дуже низької потужності, яке не є небезпечним, навіть якщо повна потужність променя потрапляє в людське око і фокусується на сітківці ока. Природна реакція до джерел дуже

яскравого світла захищає око від пошкодження сітківки при дії енергії

Кафедра авіоніки

Виконав	Соляник Р.О.			Авіаційний лазерний вимірювач вібрацій	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник	Землянський В..					69	
Консульт.					173 «Авіоніка»		
Н-контр.	Левківський В.В.						
Зав. каф.	Грищенко Ю.В.						

падіння недостатньо, щоб спричинити пошкодження сітківки при цьому. Сучасні стандарти безпеки в частині захисту здоров'я, визначили реакцію тривалістю 0,25 секунди. Таким чином, лазери класу 2 мають вихідну потужність променя 1 міліват (мВт) або менше, що відповідає допустимій межі впливу 0,25 секунд. Деякі стандарти безпеки також включають підмножину класу 2, так званий «Клас 2А». Лазери класу 2А безпечні протягом 100 секунд (16.7 протокол). Більшість комерційно використовуваних лазерних сканерів включені до 2А класу.

Клас 3. Вихідне випромінювання небезпечне, якщо пряме, дзеркально відбите та розсіяне випромінювання очей відбитого випромінювання на відстані 10 см від дифузно відбиваючого. Поверхнєве і (або) при прямому і дзеркальному опроміненні шкіри. Лазери класу випромінювання 3 небезпечні для очей, реакція не приходить досить швидко. Обмежте вплив на сітківку до рівнів, які зараз є безпечними. Також може статися пошкодження інших структур ока (наприклад, рогівка і кришталик). Випадкове опромінення становить небезпеку шкіра зазвичай не з'являється.

3А клас. Лазери та лазерні системи, які зазвичай не представляють небезпеки, якщо в цей час дивитися на лазер озброєним оком однак миттєві лазери можуть бути небезпечними. Розгляньте їх через оптичні прилади (бінокль, телескоп).

3Б клас. Небезпечні лазери та лазерні системи якщо дивитися прямо в лазер. Те саме стосується дзеркального відбиття лазерного променя. В класі 3 є багато дослідницьких лазерів, військових лазерних далекомірів, геодезичні інструменти.

Клас 4. Випромінювання небезпечне при опроміненні шкіри дифузно відбитим випромінюванням на відстані 10 см від дифузно відбиваючої поверхні. Лазери класу 4 можуть створювати потенційну небезпеку, значна небезпека для шкіри або дифузне відображення. Насправді всі хірургічні лазери та лазери для обробки матеріалів для

зварювання та різання, якщо вони не покриті захисною оболонкою, вони належать до класу 4. Усі лазери із середньою вихідною потужністю понад 0,5 Вт належать до 4 класу.

4.1. Основні положення

1.1. Основні профілактичні заходи

1.1.1. Метою стандарту є реалізація права працюючих з лазерними установками на охорону здоров'я у вигляді виключення на працюючих лазерного випромінювання, оптимізації умов і характеру праці.

1.1.2. Мета забезпечується:

а) усуненням на персонал прямого, дзеркально і дифузно відбитого, розсіяного лазерного випромінювання. У зв'язку з цим у галузі забороняється проектування та розробка лазерних установок, що допускають вплив (неконтрольованого) лазерного випромінювання на персонал;

б) застосуванням лазерних установок (і технологій) нульового (0) рангу, що виключають вплив на людину лазерного випромінювання (прямого, розсіяного та дифузно відбитого), і усувають або знижують до допустимих величин ряд супутніх небезпечних та шкідливих виробничо- професійних факторів, а також відповідають існуючим гігієнічним та ергономічним вимогам щодо оптимізації умов та характеру праці.

1.1.3. Лазерні установки, що не відповідають вимогам цього стандарту, виключаються зі сфери виробництва, а лазерні цехи та ділянки в установленому порядку закриваються (тимчасово чи постійно) органами санітарно-епідеміологічної служби, пожежного нагляду чи технічною інспекцією праці профспілки.

1.1.4. З моменту введення в дію цього стандарту у галузі забороняється придбання та експлуатація нових типів лазерних технологічних установок, що допускають вплив лазерного випромінювання на персонал.

1.1.5. При неможливості усунення безпосереднього професійного контакту персоналу з лазерним випромінюванням на лазерних установках, що нині перебувають в експлуатації, при випробуваннях, у процесі їх виготовлення та застосування в дослідних цілях, за допомогою комплексу техніко-гігієнічних заходів повинно забезпечуватися зниження рівнів відбитого лазерного випромінювання на робочих місцях до допустимих величин, визначених та контрольованих, зокрема, за СНиП 2392-81 та відповідно до ГОСТ 12.1.040-83 та ГОСТ 12.1.031-81.

1.1.6. Поліпшення умов праці досягається комплексом наступних заходів:

- застосуванням засобів колективного захисту від шкідливих і небезпечних виробничих факторів;
- використанням гігієнічних рекомендацій щодо розміщення лазерних установок, правильної організації робочих місць та виробничих приміщень;
- контролем за станом виробничого середовища;
- навчанням персоналу безпечним методам і прийомам роботи, дотриманням їм рекомендацій щодо здорового способу життя;
- медичним контролем за станом здоров'я персоналу, який працює з лазерним випромінюванням.

Нижченаведені положення стандарту поширюються на наявні в галузі лазерні установки і, перш за все, на ІЧ-лазерні технологічні установки потужністю до 100 Вт. Ці положення не застосовуються для обробки лазером токсичних матеріалів. На лазери потужністю 1—5 кВт повністю поширюється дія методичних рекомендацій ВОЗ «Гігієна праці та охорона здоров'я осіб, які працюють із потужними інфрачервоними лазерними технологічними установками».

1.1.7. Відповідальність за дотримання вимог лазерної гігієни та охорони праці, техніки безпеки та виробничої санітарії при роботах з лазерними установками відповідно до цього стандарту несе адміністрація підприємства, яка призначає наказом

відповідальну особу з числа працівників за охорону праці персоналу. Відповідальна особа має бути навчена та володіти питаннями лазерної гігієни та безпеки в обсязі цього стандарту.

1.1.8. Методичне керівництво та контроль за дотриманням вимог цього стандарту мають здійснювати служби охорони праці на підприємствах. Державний санітарний нагляд над виконанням вимог цього стандарту здійснюється органами санітарно-епідеміологічної служби. Цими організаціями забезпечується контролю над наступністю реалізації заходів з охорони праці та здоров'я персоналу всіх етапах — від проектування до експлуатації лазерних установок.

Стандарт містить:

- перелік небезпечних та шкідливих виробничо-професійних факторів, що мають місце при експлуатації лазерних технологічних установок;
- гігієнічну класифікацію лазерів, умов та характеру праці;
- загальні вимоги до проектування, розробки, влаштування та експлуатації лазерних технологічних установок, а також до лазерних виробничих приміщень, розміщення обладнання, організації робочих місць та контролю за станом виробничого середовища;
- комплексні вимоги до проектування, розробки, влаштування та експлуатації насамперед ПЧ-лазерних технологічних установок, що виключають вплив на людей лазерного випромінювання (оптимальні умови праці);
- вимоги до лазерних технологічних установок, що допускають вплив на людей дифузно відбитого лазерного випромінювання, їх розміщення, виробничих приміщень, організації та проведення робіт, індивідуальних заходів обережності працюючих та контролю за станом їх здоров'я (допустимі умови праці),
- перелік нормативно-регламентуючої документації для використання її при проектуванні, розробці та експлуатації лазерних технологічних установок.

1.1.9. При розробці та оцінці лазерних установок слід виходити з необхідності збереження та зміцнення здоров'я людей та обліку всієї системи впливу шкідливих та небезпечних факторів на організм людини машина, виробниче середовище, невиробнича сфера та інші умови.

1.1.10. Програма, план заходів та інші документи з лазерної гігієни та безпеки повинні регулярно переглядатися та оновлюватися з урахуванням нових медико-технічних та наукових даних у цій галузі, не рідше одного разу на три роки

4.2. Небезпечні та шкідливі виробничо-професійні фактори

1.2 1. При експлуатації лазерних установок на персонал можуть впливати такі небезпечні та шкідливі виробничо-професійні фактори.

- лазерне випромінювання (пряме, розсіяне, відбите);
- плазмовий смолоскип (яскравість, висока температура);
- яскраве світло та ультрафіолетове випромінювання від ламп накачування;
- низькі рівні освітленості;
- шум;
- висока електрична напруга;
- гази, аерозолі;
- тепловиділення від обладнання та нагрітих поверхонь;
- монотонія, гіпокінезія, емоційна напруженість, психологічний дискомфорт, локальні навантаження на м'язи кисті та передпліччя;
- напруженість аналізаторних функцій (зір, слух);

1.2.2 Напруженість праці операторів лазерних технологічних установок оцінюється згідно з «Гігієнічною класифікацією праці» класу та ступеня.

4.3. Гігієнічна класифікація лазерів, умов та характеру праці

1.3.1. Наведена у табл. 1 гігієнічна класифікація лазерів виходить із основного принципу охорони здоров'я - охорони здоров'я працівників. В її основі лежить поєднання двох гігієнічних постулатів

- перший, лазерне випромінювання - антропогенний і біотропний фактор, його вплив на персонал має бути виключено;
- другий, для низки умов застосовується гігієнічний регламент, що реалізується через гранично допустимі рівні (ІДП) лазерного випромінювання.

1.3.2 Гігієнічна класифікація лазерів орієнтує створення лазерних установок нульового (0) рангу, що виключають вплив на персонал шкідливого чинника і радикально спрощує процедуру класифікації лазерів. Ранг установки вказує на рівень забезпечення безпеки здоров'я персоналу, клас умов і характеру праці за основним шкідливим фактором - лазерним випромінюванням.

Ранг лазера та клас умов, характеру праці слід зазначати у будь-якій рекламно-інформаційній літературі, каталогах, буклетах, проспектах, цінниках та ін.

Таблиця 4.1.

Гігієнічна класифікація лазерів, умов та характеру праці

Ранг лазера	Характеристика *	Умови та характер праці**
0 закриті	Виключено вплив на людину лазерного випромінювання (будь-яких рівнів та параметрів)	Оптимальні І клас

I відкриті	Рівні лазерного випромінювання, що впливають на людину, менші або рівні ПДУ	Допустимі II клас
II відкриті	Рівні лазерного випромінювання, що впливають на людину, більше ПДК (розглядається як виняток)	Шкідливі та небезпечні III клас
III*** медичні	Передбачено вплив лазерного випромінювання на людину (пацієнта) у спеціальних умовах та відповідній дозі.	-

1.3.3. Нові лазерні установки класифікуються за рангами підприємством-виробником шляхом вимірювання (індикації) рівнів відбитого та розсіяного лазерного випромінювання у робочій зоні. За наявності останніх їх порівнюють з ПДУ. Лазери, що діють у галузі, класифікуються підприємствами-споживачами. Ранг установки узгоджується з органами Державного санітарного нагляду (обласною чи республіканською санепідстанцією), що контролюють правильність використання класифікації. Параметри лазерного випромінювання на установках під час експлуатації повинні відповідати паспортним характеристикам.

Відповідно

*) - з методичними рекомендаціями ВОЗ

***) - "Гігієнічної класифікації праці" ВОЗ

****) - Лазерні установки III рангу не розглядаються в даному ГОСТ.

Якщо організація споживач модернізує лазерну установку або виконує спеціальні роботи зі зміною її технічних характеристик (рангу), то відповідальність за правильність використання класифікації покладається на цю організацію.

1.3.4. Використання ПДК лазерного випромінювання обмежується. Гігієнічний регламент — ПДУ слід застосовувати у випадках, коли аргументування виключається можливість цьому етапі розвитку лазерної техніки повного захисту персоналу (усунення на нього лазерного випромінювання).

1.3.5. Опромінення персоналу лазерним випромінюванням, яке в окремих випадках навіть не перевищує регламентованих рівнів (ПДУ), повинно узгоджуватися з органами Державного санітарного нагляду (обласної або республіканської СЕС) за наявності документації, що підтверджує можливість адміністрації забезпечити пільгами працюючих у шкідливих умовах праці відповідно до чинного законодавства. Дозвіл має бути тимчасовим, на конкретний термін.

1.3.6. У галузі забороняється експлуатація лазерних установок II рангу (у яких рівні відбитого лазерного випромінювання робочих місцях операторів перевищують ПДУ).

4.4. Загальні вимоги до проектування, розробки, пристрої та експлуатації лазерних технологічних установок

1.4.1. Технічна документація на проєктовану лазерну технологічну установку повинна містити розділ з охорони праці та здоров'я персоналу, який передбачає конкретні заходи щодо лазерної гігієни та безпеки згідно з рангом лазера (установки). У ній мають бути відображені вимоги до конструкції установки щодо забезпечення оптимальних умов праці, зокрема, дані про шкідливі виробничо-професійні фактори та конкретні заходи щодо запобігання їх впливу на людину. Технічні завдання та умови на проєктування, розробку лазерних технологічних установок (включаючи дослідні зразки) та іншу нормативно-технічну документацію на лазерну установку узгоджуються в установленому порядку з Головним державним санітарним лікарем республіки, на

території якої знаходиться організація-розробник, а також з іншими зацікавленими організаціями .

1.4.2. Проекти технічних умов лазерні технологічні установки повинні піддаватися експертному розгляду. При їх узгодженні слід додавати акт приймання та протокол приймальних випробувань дослідного зразка лазерної технологічної установки, копію технічного завдання на розробку, а також експлуатаційні документи (інструкцію, паспорт та ін.).

1.4.3. До складу комісії з приймання дослідного зразка лазерної технологічної установки повинні включатись фахівці санепідслужби, згідно з ГОСТ, а також можуть залучатися гігієністи, наприклад, з НДІ та ВНЗ. Участь останніх доцільна у попередніх та приймальних випробуваннях лазерної технологічної установки. Їхнім завданням є визначення відповідності дослідного зразка гігієнічним вимогам, рівню технічного завдання. Найбільш оптимальним є залучення гігієністів до розробки лазерної техніки, починаючи з етапу проектування і далі на всіх етапах, аж до серійного випуску.

1.4.4. За погодженням у ВОЗ матеріалів на лазерні технологічні установки, що приймаються в серійне виробництво, відповідно до встановленого порядку подається така документація: проект технічних умов за ГОСТ, акт приймання дослідного зразка та протокол приймальних випробувань за ГОСТ, експлуатаційні документи за ГОСТ, технічне завдання з ГОСТ, а також експертний висновок санепідстанцій (обласний СЕС), а у разі потреби та наукового підрозділу гігієнічного профілю з матеріалами лабораторно-інструментальних досліджень.

1.4.5. Необхідно виключати з технологічного процесу безпосередні візуальні спостереження за лазерним випромінюванням, моментом взаємодії лазерного пучка з матеріалом, що обробляється.

Контроль за зоною обробки матеріалів можна здійснювати дистанційно за допомогою проекторів, телевизорів та інших пристроїв. За наявності проектора світло

його екрана має бути зеленим, з яскравістю 70 кд/м² за ГОСТ. Виходячи з умов безпечної роботи персоналу, допускається використання спеціальних екранів, світлофільтрів, захисних шторок, діафрагм і т.д. Окуляри повинні відповідати ГОСТ.

1.4.6. Доцільно передбачати автоматичне юстування та дистанційний контроль за юстуванням лазера.

1.4.7. Кожна установка забезпечується оперативним зв'язком для виклику наладчика при порушеннях у роботі обладнання.

1.4.8. Показники контролю параметрів лазерного випромінювання, передусім, енергії (потужності), можуть виводитися пульт управління лазерної технологічної установки. Керування установкою може бути дистанційним.

1.4.9. Лазерна установка повинна забезпечуватися рядом блокувань для забезпечення безпеки працюючих та запобігання пошкодженням установки у разі відхилення від умов, що регламентуються даними ГОСТ та іншими нормативно-регламентуючими документами, у тому числі зазначеними в інструкції з експлуатації. За наявності такого відхилення автоматично відключається висока напруга і тим самим стає неможливим включення лазера в тому числі при зміні деталей, що обробляються вручну. З пульта керування повинен здійснюватись контроль за станом усіх блокувань.

1.4.10. Температура поверхневих частин лазерної установки, з якими може стикатися людина, має перевищувати 35°. Поверхні лазерної технологічної установки, а також різних приставок, пристроїв, тари повинні бути матовими, не блискучими, забарвлення — чорного, зеленого, синьо-блакитного або інших спеціальних кольорів, які максимально поглинають лазерне випромінювання конкретної довжини хвилі. Основу установки можна фарбувати в будь-який колір, наприклад, помаранчевий. Однак кількість кольорів в оформленні обладнання не повинна бути більше трьох, за винятком сигнальних і відмінних. Вирішення питань кольорового забарвлення (поєднання кольорів) має бути єдиним, при цьому не виключається консультація художника-

фахівця з промислової естетики. Колір сигнальних пристроїв, індикаторів і кнопок повинен відрізнятися під час використання протилазерних окулярів із кольоровими світлофільтрами, тобто застосування окулярів має забезпечувати спостереження кольорових інформаційних сигналів.

1.4.11. Дверцята різних відсіків установки повинні щільно прилягати до корпусу. Вони забезпечуються відповідними написами, що пояснюють Дверцята, які забезпечують доступ до вузлів високої напруги, повинні мати замок з ключовим відкриванням.

1.4.12. Характер роботи оператора потребує оптимальної зони моторного поля робочого місця. Робоче місце оператора лазерної технологічної установки та взаємне розташування всіх його елементів (органи управління, засоби відображення інформації, оповіщення тощо) повинні відповідати гігієнічним, антропометричним, фізіологічним, психологічним вимогам та характеру роботи. При проектуванні обладнання необхідно забезпечити раціональність робочих рухів, максимально пристосувати його до енергетичних, швидкісних, силових характеристик та психофізіологічних можливостей людини. Слід вибирати найбільш короткі траєкторії руху, що вимагають мінімальних зусиль, уникати нераціональних робочих поз.

1.4.13. При розміщенні пульта управління технологічним процесом не так на лінії погляду, його доцільно виконувати не вертикально, а під кутом, для зручнішого спостереження показаннями приладів і кращого їх висвітлення.

1.4.14. При виборі та розміщенні індикаторів слід враховувати способи прийому та переробки інформації оператором та налагоджувачем. Індикатори з підсвічуванням застосовують для відображення якісної інформації, що вимагає негайної реакції оператора, або привертає увагу до стану системи при технічному обслуговуванні та регулюванні. Рівень зовнішнього засвічення не повинен перевищувати 10% яскравості екрана. Зміни стану індикаторів повинні відображати зміни функціонального стану системи, а не результати дії органів управління.

1.4.15. Пристрої застереження та тривоги, відображення стану комплексу апаратурних систем потрібно розташовувати окремо від засобів передачі світлових сигналів, що показують стан різних компонентів та вузлів. Їхні сигнали не повинні здаватися такими, що світяться, коли вони не світяться, і повинні відрізнятися інтенсивністю (або) переривчастістю свічення (частота миготіння 3-5 Гц і тривалість сигналу не менше 0,2 секунди).

1.4.16 Екрани індикаторів або покажчиків з написами слід конструювати так, щоб запобігти випадковій перестановці скла. Слід передбачити заміну ламп з лицьового боку панелі, без застосування інструментів, не викликаючи небезпеки пошкодження компонентів індикаторного ланцюга і не наражаючи на небезпеку обслуговуючий персонал. До засобів, що запобігають втраті інформації внаслідок відображення зовнішнього освітлення (особливо прямого сонячного світла) від поверхні індикатора, належать екрани, ковпаки. Освітлення шкали має бути рівномірним

1.4.17. Стрільні індикатори на панелі слід встановлювати в площині перпендикулярної лінії погляду. На шкалах слід вводити додаткові сигналізатори.

1 4.18. Звукове сповіщення слід застосовувати, перш за все, при утрудненні розбіжності світлових сигналів у протилазерних окулярах, порушення захисних блокувань. Звуковий сигналізатор немовних повідомлень повинен привертати увагу працюючого шляхом подачі уривчастих сигналів і повідомляти йому про відмову або зміни в системах, що забезпечують безпеку. При цьому він не повинен перевантажувати слуховий аналізатор оператора, відволікати увагу інших працюючих, заважати мовному зв'язку, стомлювати і лякати людей. Тривалість звучання звукового імпульсу – не менше 0,2 с.

1.4.19. При виборі органів управління, їх розміщення слід враховувати безпеку, зручність експлуатації, біомеханічні, антропометричні особливості дій оператора та принципи технічної естетики.

1.4.20. Органи управління повинні бути згруповані з урахуванням послідовності дії (зліва направо та зверху вниз). За виконання вихідних функцій вони розташовуються однаково різних панелях і мають однакові розміри. Форми органів управління мають легко ідентифікуватись.

1.4.21. Особлива увага приділяється тим органам управління, необережне та випадкове переміщення (включення) яких може призвести до травмування людини, пошкодження обладнання. Для захисту від випадкового спрацювання вузлів та механізмів необхідно враховувати їх розміщення, передбачати блокування, замки для запобігання переходу в заборонене положення, екранування та інші способи. Ключове включення має бути на пульті керування. Ключ слід виготовляти знімним, за його відсутності лазерна установка не повинна працювати.

1.4.22. Для швидкості увімкнення та вимкнення апаратури, враховуючи частоту виконання дій, необхідне застосування кнопок (кнопкою). Їх колір має бути яскравим, насиченим, контрастним із кольором панелі.

1.4.23. Поверхня кнопки повинна мати увігнуту форму та рифлення для запобігання зісковзування. Найбільш зручна чотирикутна форма із закругленими кутами або верхньою кромкою. Конструкція кнопки повинна забезпечувати відчуття клацання, чутне клацання або й те й інше. Для запобігання випадковому включенню та аварійному відключенню лазерної технологічної установки кнопки слід поглиблювати або постачати захисну кришку; вони повинні виділятися розміром, кольором та формою. Їх розміщують у верхній частині оптимальної робочої зони ізольовано від інших кнопок, щоб уникнути випадкового включення.

1.4.24. Кнопки пульта керування доцільно розміщувати на панелі, похилій до поверхні столу, з оптимальним кутом нахилу клавіатури кнопкового пульта – 15° до горизонтальної площини. Кнопку загального вмикача установки слід розташовувати в безпосередній близькості до оператора, що важливо і для аварійних ситуацій.

4.5. Загальні вимоги до лазерних виробничих приміщень, розміщення обладнання, організації робочих місць

Контроль за станом виробничого середовища

1.5.1. Розміщення установок у кожному конкретному випадку вимагає врахування характеру, умов та режиму праці персоналу, особливостей техпроцесу та обладнання, кількості експлуатованих лазерних верстатів, підведення комунікацій, планування приміщень, природного освітлення, наявних регламентуючих документів і т.д.

1.5.2. При горизонтальному розташуванні випромінювача лазера з метою попередження попадання на людей прямого лазерного пучка, що може виходити з її торця, установки мають ряди, симетрично, щоб лазерні випромінювачі були строго один проти одного. При багаторядному розміщенні — тільки торець установки до торця установки, а не інакше, наприклад, торцем до проходу, лицьової або бічної сторони сусідньої установки, оскільки це може призвести до пошкодження комунікацій та ураження електрострумом. Лазерні установки слід розташовувати так, щоб досягався максимальний ефект освітлення природним світлом робочої зони, наприклад, лицьовими сторонами до світлопройомів, що доцільно, перш за все, при їх однорядному розміщенні.

1.5.3. При недостатній ефективності застосовуваних захисних заходів, наприклад, наявності високих рівнів шуму на робочих місцях (передусім, у процесі отримання отворів в оброблюваному матеріалі), слід обмежувати кількість установок у приміщенні.

Наприклад, в одному приміщенні бажано розташовувати не більше 20 лазерних технологічних установок типу Корунд, АК-378 і не більше 10 типу АК-345.

1.5.4. Підведені до лазерних установок комунікації (вода, електроенергія, повітря, інертні гази, вакуумсистеми та ін.) слід прокладати під підлогою у спеціальних каналах із захисними коробами, які не повинні підніматися над його рівнем, або підвішувати кабелі на висоті не менше від підлоги.

1.5.5. При розміщенні лазерних технологічних установок має бути передбачене місце для зберігання заготовок та оброблених деталей, розміщення знімних деталей установки, переносної вимірювальної апаратури, а також столу (для записів в оперативному журналі та місця знаходження персоналу, при обробці матеріалів у підлозі та автоматичному режимі).

1.5.6. Приміщення можуть бути обладнані тельферами або іншими підйомними механізмами для проведення ремонтних робіт, подачі важких заготовок в зону обробки, технологічну кабінку та інших маніпуляцій.

1.5.7. Висота приміщень має бути не менше.

1.5.8. Приміщення повинні відповідати вимогам пожежної безпеки та мати необхідні засоби пожежогасіння (обов'язково вуглекислотні вогнегасники). Вимоги пожежної та вибухонебезпечності розробляються, виходячи з конкретних особливостей лазерних установок, умов їх експлуатації та характеру виробництва на основі ГОСТ та інших документів, що регламентують. Двері лазерних приміщень повинні бути вільно відкриваються зсередини по ходу евакуації. Оздоблення конструкцій, що захищають, шляхів евакуації (коридорів) має бути виконане з негорючих матеріалів.

1.5.9. Для забезпечення технологічного процесу обробки деяких матеріалів у лазерних цехах слід з урахуванням характеру та умов праці передбачати пости оперативного спостереження та проекторні кабінки, що визначається і при проектуванні установки. Кількість столів, кабін та проекторів визначається потребами виробництва,

але рекомендується не менше 1 проєктора та 1 столу на 3-4 лазерні установки. Роботу на проєкторі, що знаходиться окремо від лазера, доцільно проводити в положенні сидячи, якщо робота на лазері здійснюється стоячи і навпаки. При цьому необхідні стільці, що обертаються, зі спинкою — раціональні з фізіологічної точки зору. Пости оперативного спостереження також оснащують зручними кріслами із підлокітниками.

1.5.10. Проєкторні та котирувальні кабінки необхідно покривати світлонепроникним матеріалом. Загальне освітлення в кабінці виконується світильником розсіяного світла з лампою розжарювання, світловий потік від якого прямує у верхню півсферу та забезпечує рівень загальної освітленості 50 лк. При цьому робітнику створюють умови для переадаптації очей, наприклад, за допомогою реостату освітленість поступово знижується до необхідної.

1.5.11. Регулярно, не рідше одного разу на 6 місяців, а також після капітального ремонту лазерів слід вимірювати рівні прямого лазерного випромінювання, які повинні відповідати паспортним характеристикам. У разі їх невідповідності, слід проводити вимірювання рівнів потужності (енергії) розсіяного та дифузно відбитого лазерного випромінювання.

1.5.12. Вимірювання параметрів (дифузно) відбитого лазерного випромінювання виконують лише на «відкритих» лазерних установках (1 рангу), тобто таких, при експлуатації яких можливе не лише його утворення, а й вплив на людину. Вимірювання проводять відповідно до Методичних вказівок та ГОСТ. Універсальний лазерний дозиметр ІЛД-2М (серійно, що випускається) дозволяє здійснювати вимірювання дистанційно. Рекомендується використовувати індивідуальні індикатори лазерного випромінювання. Вимірювання потрібно проводити і на «закритих» лазерних установках (де повністю виключено вплив випромінювання на персонал), але вже з метою перевірки надійності та ефективності засобів колективного захисту (кабін, екранів, щитків та ін.).

1.5.13. Контроль та визначення супутніх шкідливих виробничих факторів на робочих місцях здійснюється відповідно до санітарних норм і правил, вказівок, рекомендацій, стандартів. Контрольні вимірювання повинні проводитися в постійних точках (місце їх узгоджується з санепідслужбою), що забезпечують можливість об'єктивної оцінки факторів на робочих місцях та у приміщенні. Контрольні точки заносяться до санітарного паспорта лазерної технологічної установки та цеху.

1.5.14. Контроль за станом повітря робочої зони необхідно виконувати відповідно до ГОСТ.

1.5.15. Параметри мікроклімату у виробничих приміщеннях повинні відповідати оптимальним згідно з ГОСТ. Так, у теплий період року оптимальна температура повітря повинна перебувати в межах 18-23°C (з урахуванням категорії робіт), в холодний період 21-25°C. Відносна вологість повітря має бути в межах 40—60%.

1.5.16. Лазерні цехи слід обладнати загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією (бажано кондиціонування повітря). Робоче місце, залежно від наявності шкідливих речовин, у зоні обробки, обладнується місцевим відсмоктуванням. Витяжка повітря повинна здійснюватися із зони лазерної обробки та виключати надходження у приміщення продуктів обробки (за їх наявності).

1.5.17. Розрахунок повітрообміну в лазерних цехах слід здійснювати за токсичними газами та аерозолями, теплонадлишками (від обладнання, освітлення, персоналу, сонячної радіації). Подачу припливного повітря з підігрівом у зимовий час слід проводити у верхню зону приміщення розосередження (доцільно через підшивну перфоровану стелю), забезпечуючи швидкість руху повітря на робочих місцях не більше 0,3 м/с. Витяжку повітря слід здійснювати на третину з верхньої зони приміщення та на дві третини з робочої зони. Повітропроводи мають відповідати вимогам промислової естетики. Загальна вентиляція вмикається до початку роботи та експлуатується до кінця роботи в цеху.

1.5.18. Контроль за вмістом аероіонів у повітрі на робочому місці повинен проводитися відповідно до СНиП 2152-80 та доповнення до нього від 14.09.83 р. Для лазерних цехів слід вважати оптимальним вміст 1 см³ повітря наступної кількості іонів: позитивних іонів 1500-3000, негативних - 3000-5000; показник полярності – від 0,5 до 0.

1.5.19. У зв'язку з особливостями праці персоналу, який обслуговує лазерні установки, рівні шуму на робочих місцях не повинні перевищувати 65 дБА (крива ПС-60) за СНиП 3223-85. Вимірювання шуму від лазерних установок слід проводити з урахуванням максимальних енергетичних та технологічних навантажень на установки при обробці конкретних матеріалів та відповідно до ГОСТ 20445-75; ГОСТ 12.1.003-83; СНиП 3223-85, а також Методичними вказівками ВОЗ щодо проведення вимірювань та гігієнічної оцінки шумів на робочих місцях.

1.5.20. Рівні шуму на робочому місці в проекторній кабіні та інших робочих місцях також не повинні перевищувати нормовані величини. У разі перевищення рівнів, що нормуються, покриття кабін виконується з звукоізолюючого або поглинаючого матеріалу світло-зелених, сірих або інших спеціальних тонів, що сприяє і захисту від лазерного випромінювання. При ефективному екрануванні кабін їхня відстань від лазерів не лімітується.

1.5.21. З метою зниження загального рівня шуму вентилятори слід виносити за межі виробничих приміщень та встановлювати на шумо- та віброізолюючих підставах, приєднання повітроводів слід здійснювати через брезентові вставки. Глушники шуму в повітроводах повинні встановлюватися відповідно до акустичних розрахунків. При цьому слід керуватися СНиП 11-12-77, частина 2.

1.5.22. Вибір світильників визначається насамперед світлорозподілом, що враховує рівень освітленості, що нормується, для конкретних лазерних установок і технологічних процесів, площиною розташування робочих поверхонь, а також умовами розміщення лазерної технологічної установки (ЛТУ), архітектурно-будівельними рішеннями виробничих приміщень, умовами повітряного середовища. У кожному конкретному

випадку, особливо якщо робочі поверхні розміщені у вертикальній та похилій площинах, доцільно проводити варіантні розрахунки освітленості.

1.5.23. Коефіцієнт запасу (K_z), що визначає компенсацію зниження освітленості залежно від умов експлуатації та повітряного середовища приміщень, місць встановлення світильників, тривалості роботи, їх конструктивних особливостей та термінів чищення повинен бути не нижче 1,4 (СНіП П-4-79).

1.5.24. У лазерних цехах слід передбачати централізовані способи керування освітленням. З метою найбільш ефективного максимального використання природного світла слід застосовувати фотоелектронні апарати, що керують штучним освітленням залежно від рівня природного освітлення (світлового клімату місцевості). При цьому слід враховувати різновіддаленість лазерних технологічних установок від світлопроекторів (особливо при бічному освітленні), режим їхньої роботи.

1.5.25. Для безпечного виходу персоналу з приміщення у разі відключення робочого освітлення (аварійного) слід передбачати евакуаційне освітлення. Доцільно наявність чергового освітлення, тобто можливості окремого включення невеликої частини світильників, що створюють по всій площі приміщення освітленість, необхідну для його збирання, охорони. При повній автоматизації лазерного технологічного процесу та відсутності людей у приміщенні можна відключати освітлення, за винятком евакуаційного.

1.5.26. Незалежно від системи освітлення, контрольні точки освітленості повинні розташовуватися на робочих місцях лазерних установок: обов'язково в зоні обробки матеріалів, місцях контролю та управління, розміщення матеріалу, що обробляється, на шкалах приладів і т. д.; у площині розташування робочої поверхні (горизонтальної, вертикальної, похилої). Для приміщення площею число контрольних точок становить 30. При вимірі освітленості доцільно проводити контроль напруги мережі і у разі його відхилення вносити поправку в результати вимірювання. Контроль освітленості здійснюється за ГОСТ.

1.5.27. У лазерних цехах не рекомендується використання установок штучного ультрафіолетового опромінення (наприклад, що використовуються для корекції сонячного голодування та розміщуються у світильниках разом із звичайними джерелами освітлення).

1.5.28. Для зручності проведення ремонтних робіт на лазері та їх безпеки повинні використовуватися діелектричні килимки та підставки.

1.5.29. У приміщенні, де розміщені лазерні технологічні установки, має бути аптечка. За її укомплектованість та безпеку несуть відповідальність керівник підрозділу та медичний працівник.

1.5.30. На прикріпленій до лазерного цеху (дільниці) медичний персонал покладається на проведення та організацію санітарно-освітньої роботи серед працівників, які обслуговують лазерні технологічні установки.

1.5.31. До розробки лазерних технологічних установок та постів необхідно залучати спеціалістів-дизайнерів, які повинні враховувати комплекс вимог з охорони праці та лазерної гігієни, а також забезпечувати естетичний рівень — гармонійність, світлосвітову, композиційну узгодженість лазерного технологічного обладнання та його модулів, особливо в робочій зоні, оптимальність робочих поз та трудових рухів; композиційну цілісність інтер'єрів робочих приміщень, включаючи озеленення, декоративно-мистецькі об'єкти, засоби візуальної комунікації у цехах.

1.5.32. Вивчення на підприємствах соціально-гігієнічних та психологічних умов праці та побуту працівників, які обслуговують лазерні установки, з метою розробки заходів щодо оздоровлення цих умов, доцільно здійснювати за допомогою анкетування та анонімного опитування.

1.5.33. Лазерний цех має бути укомплектований:

- аптечкою, відповідно до складеного переліку;
- приладом для вимірювання енергії прямого лазерного пучка;
- люксометром "Ю-116";
- діелектричними рукавичками та килимками;
- діелектричними підставками;
- телефоном;
- протилазерними окулярами чи щитками (для наладчиків);
- інструкціями з пуску, регулювання, управління та експлуатації лазерної установки, операцій технологічного процесу;
- інструкцією з гігієни та охорони праці, техніки безпеки (на кожній установці).

1.5.34. Побутове забезпечення працюючих, з урахуванням санітарних характеристик професій, проводиться у разі СНиП 2.09.04—(86).

Отже, перше правило лазерної безпеки: ніколи, ні за яких обставин не дивитись на лазерний промінь.

Друге - потенційні місця пошкодження ока безпосередньо пов'язані з довжиною хвилі лазерного випромінювання.

Третє - при роботі з лазерами необхідно мати окуляри, які захищають від лазерного випромінювання. Захисні окуляри потрібні навіть для лазера 15мВт, так як без них очі сильно втомлюються. Для захисту очей не можна використовувати сонцезахисні окуляри! Ступінь захисту окулярів від лазерного випромінювання вимірюється в OD (Optical Density - оптична щільність). Оптична щільність показує, у скільки разів окуляри послаблюють світло. Одиниця означає «в 10 разів». Відповідно, «оптична щільність 3» означає ослаблення в 1000 разів, а 6 - в мільйон. Правильна оптична щільність для видимого лазера така, щоб після окуляр від прямого попадання лазера залишилася потужність, яка відповідає класу II (максимум десь 1 мВт). Для невидимого - чим більше, тим краще.

РОЗДІЛ 5

ЛАЗЕРНА БЕЗПЕКА

5.1. Максимально допустима взаємодія

Дослідники FAA склали базу даних про більш ніж 400 зареєстрованих інцидентів, що відбулися в період з 1990 по 2004 рік, в яких пілоти були налякані, абстрактні, тимчасово засліплені або дезорієнтовані лазерним впливом. Вплив ручного лазерного світла в таких умовах може здатися тривіальним, враховуючи стислість впливу, великі відстані та поширення променя до кількох метрів. Однак лазерне опромінення може створити небезпечні умови, такі як сліпота спалаху. Якщо це станеться в критичний момент експлуатації літака, літак може опинитися в небезпеці. Крім того, від 18% до 35% населення мають аутосомно-домінантну генетичну ознаку, світлове чхання, через яку хвора людина відчуває мимовільне чхання. підходять при раптовому спалаху світла.

Максимально допустима дія (МРЕ) - це максимальна потужність або щільність енергії (в Вт/см або Дж/см) джерела світла, яке вважається безпечним, тобто має незначну ймовірність створення пошкоджень. Зазвичай близько 10% дози має 50% шанс завдати шкоди за найгірших умов. МРЕ вимірюється на рогівці людського ока або на шкірі для даної довжини хвилі та часу експозиції.

При розрахунку МРЕ на очей враховуються різні способи впливу світла очей. Наприклад, глибоке ультрафіолетове світло викликає накопичення пошкоджень навіть за дуже низької потужності. Інфрачервоне світло з довжиною хвилі більше приблизно 1400 нм поглинається прозорими частинами ока до досягнення сітківки, що означає, що МРЕ для цих довжин хвиль вище, ніж для видимого світла. Крім довжини хвилі та часу експозиції, МРЕ враховує просторовий розподіл світла (від лазера чи іншого).

~~Колімовані лазерні промені видимого та ближнього інфрачервоного~~

<i>Кафедра авіоніки</i>							
<i>Виконав</i>	Соляник Р.О.			Авіаційний лазерний вимірювач вібрацій	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	Землянський В..					91	
<i>Консульт.</i>					173 «Авіоніка»		
<i>Н-контр.</i>	Левківський В.В.						
<i>Зав. каф.</i>	Грищенко Ю.В.						

світла особливо небезпечні при відносно малих потужностях, тому що лінза фокусує світло на крихітній плямі на сітківці. Джерела світла з меншою мірою просторової когерентності, ніж добре колімований лазерний промінь, такі як потужні світлодіоди, призводять до розподілу світла на більшій площі сітківки. Для таких джерел МПЭ вище, ніж для колімованих лазерних пучків. При обчисленні МРЕ передбачається найгірший сценарій, в якому лінза ока фокусує світло в пляму найменшого можливого розміру на сітківці для конкретної довжини хвилі, а зіниця повністю відкрита. Хоча МРЕ визначається як потужність або енергія на одиницю поверхні, він заснований на потужності або енергії, які можуть пройти через повністю відкриту зіницю (0,39 см) для видимих та близьких інфрачервоних хвиль. Це актуально для лазерних променів із поперечним перерізом менше 0,39 см. Стандарти IEC-60825-1 та ANSI Z136.1 включають методи розрахунку МРЕ.

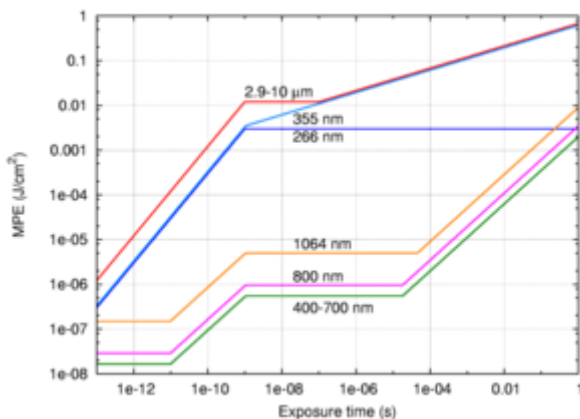


Рис.5.1. Максимально допустимий вплив (МРЕ) на рогівку для колімованого лазерного променя згідно IEC 60825, як щільність енергії в залежності від часу впливу для різних довжин хвиль

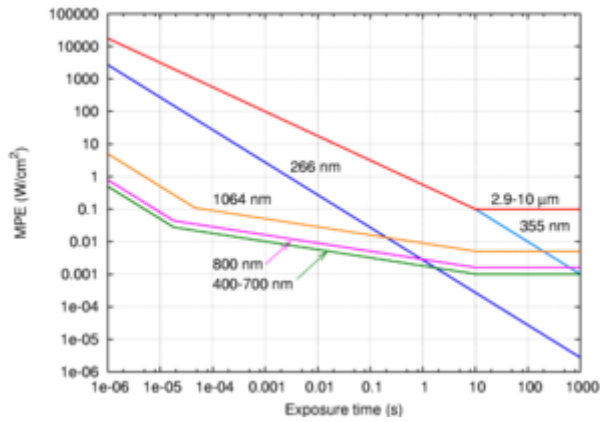


Рис.5.2. МРЕ як щільність потужності в залежності від часу впливу для різних довжин хвиль

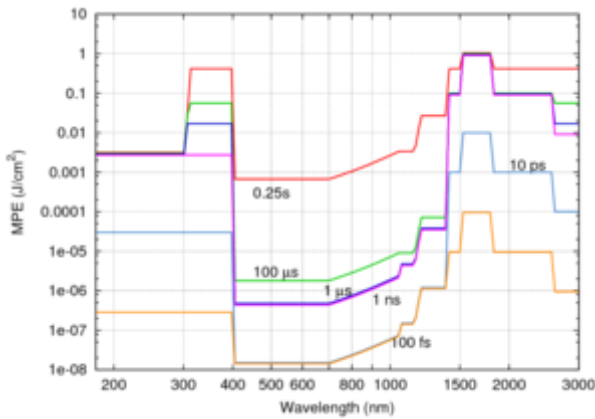


Рис.5.3. МРЕ як залежності щільності енергії від довжини хвилі різних значень часу дії (тривалості імпульсу)

5.2. Нормативи

У різних юрисдикціях органи стандартизації, законодавство та урядові постанови визначають класи лазерів відповідно до ризиків, пов'язаних з ними, та визначити необхідні заходи безпеки для людей, які можуть зазнати впливу цих лазерів.

У Європейському співтоваристві (ЕС) вимоги до захисту очей вказані у європейському стандарті EN 207. Крім EN 207, європейський стандарт EN 208 визначає вимоги до захисних окулярів для використання під час вирівнювання променя. Вони пропускають

частину лазерного світла, дозволяючи оператору бачити, де знаходиться промінь, і забезпечують повного захисту від прямого потрапляння лазерного променя. Нарешті, європейський стандарт EN 60825 визначає оптичну густину в екстремальних ситуаціях.

Посібник із використання захисних окулярів та інших елементів безпечного використання лазера дається у серії стандартів ANSI Z136. Ці узгоджені стандарти призначені для користувачів лазерів, і повні копії можна придбати безпосередньо в ANSI або офіційному секретаріаті акредитованого комітету зі стандартів (ASC) Z136 та видавця цієї серії стандартів ANSI, Американського інституту лазерів <234.>. Стандарти такі:

ANSI Z136.1 - Безпечне використання лазерів.

Z136.1 є основним документом для серії стандартів лазерної безпеки серії Z136. програм лазерної безпеки для промисловості, збройних сил, досліджень та розробок (лабораторії) та вищої освіти (університети).

ANSI Z136.2 - Безпечне використання оптоволоконних систем зв'язку з використанням лазерних діодів та джерел світлодіодів.

Цей стандарт містить посібник із безпечного використання, технічного обслуговування, ремонту та встановлення систем оптичного зв'язку, в яких використовуються лазерні діоди або світловипромінюючі діоди, що працюють на довжинах хвиль від 0,6 мкм до 1 мм. Системи оптичного зв'язку включають наскрізні оптоволоконні лінії зв'язку, фіксовані наземні лінії зв'язку точка-точка у вільному просторі або їх комбінацію.

ANSI Z136.3 - Безпечне використання лазерів у охороні здоров'я.

Надає рекомендації для осіб, які працюють з потужними лазерами та лазерними системами класів 3B та 4 у сфері охорони здоров'я (включаючи, але не обмежуючись: персонал операційної, призначений фахівцем з лазерної безпеки (LSO)).

ANSI Z136.4 - Рекомендована практика вимірювання лазерної безпеки для оцінки небезпеки.

Містить посібник з процедур вимірювання, необхідних для класифікації та оцінки небезпек оптичного випромінювання.

ANSI Z136.5 - Безпечне використання лазерів в освітніх установах.

У цьому стандарті розглядаються питання лазерної безпеки в освітніх установах.

ANSI Z136.6 - Безпечне використання лазерів на відкритому повітрі.

Цей стандарт містить посібник із безпечного використання лазерів на відкритому повітрі, наприклад, у будівництві, дисплеї / лазерні світлові шоу, наукові / астрономічні наукових досліджень та військових (DoE / DoD).

ANSI Z136.7 - Випробування та маркування обладнання для захисту від лазерів.

Метою цього стандарту є надання розумних та адекватних рекомендацій щодо методів та протоколів випробувань використовується для захисту очей від лазерів та лазерних систем.

ANSI Z136.8 - Безпечне використання лазерів у дослідженнях, розробках чи випробуваннях.

Метою цього стандарту є надання посібника з безпечного використання лазерів та лазерні системи, що використовуються в дослідницьких, дослідно-конструкторських або випробувальних середовищах, де заходи безпеки, загальні для комерційних лазерів, можуть бути відсутніми або відключатися.

ANSI Z136.9 - Безпечне використання лазерів у виробничих середовищах.

Призначений для захисту людей з потенційним впливом лазерного випромінювання при використанні лазерів у виробничому середовищі, цей стандарт включає правила та

процедури для забезпечення лазерної безпеки як у державних, так і в приватних галузях, а також при розробці продукції та тестуванні.

Відповідно до 21 CFR 1040, Управління лікарських засобів (FDA) регулює лазерні продукти, що надходять у продаж, і вимагає, щоб усі лазери класу IIIb і класу IV, що пропонуються в торгівлі, мали п'ять стандартних функцій безпеки: перемикач з ключем, захисний ключ блокування, індикатор живлення, апертурна заслінка та затримка випромінювання (зазвичай від двох до трьох секунд). OEM-лазери, розроблені як частина інших компонентів (наприклад, записуючих DVD-пристроїв), звільнені від цієї вимоги. Деякі непереносні лазери можуть не мати захисного ключа або затримки випромінювання, але мати кнопку аварійної зупинки та/або дистанційний перемикач.

5.3. Класифікація



Рис.5.4. Максимально допустима безперервна потужність для лазерів класів 1, 2, 3R і 3B відповідно до стандарту EN 60825-1: 2007.

Зверніть увагу, що ці значення справедливі тільки для статичних точкових лазерних джерел (тобто лазерних променів, що колімуються або слабо розходяться).

Лазери були класифіковані за довжиною хвилі та потужності на чотири класи та кілька підкласів з моменту початку 1970-х. Класифікація поділяє лазери на категорії

залежно від їхньої здатності завдавати шкоди людям, які зазнали впливу, від класу 1 (відсутність небезпеки при нормальному використанні) до класу 4 (серйозна небезпека для очей та шкіри). Існують дві системи класифікації: «стара система», що використовується до 2002 року, та «переглянута система», що вводиться поетапно з 2002 року. Остання відображає більш глибокі знання про лазери, накопичені з моменту розробки початкової системи класифікації, і дозволяє певні типи лазерів, які повинні бути визнані такими, що мають меншу небезпеку, ніж передбачалося їх розміщенням у вихідній системі класифікації. Оновлена система є частиною оновленого стандарту IEC 60825. З 2007 року оновлена система також включена до орієнтованого стандарту ANSI лазерної безпеки (ANSI Z136.1). З 2007 року FDA приймає маркування відповідно до нової системи на лазерних виробках, що імпортуються. Старі та змінені системи можна відрізнити за класами 1M, 2M та 3R, що використовуються лише у переглянутій системі, та класами 2A та 3A, що використовуються лише у старій системі. Номери класів позначалися за допомогою римських цифр (I – IV) за старою системою та арабських цифр (1–4) у ЄС. У переглянутій системі використовуються арабські цифри (1–4) у всіх юрисдикціях.

Класифікація лазерів ґрунтується на концепції доступних меж випромінювання (AEL), які визначені для кожного класу лазера. Зазвичай це максимальна потужність (Вт) або енергія (Дж), яка може випромінюватись в зазначеному діапазоні довжин хвиль і часу експозиції, яка проходить через вказану діафрагму на вказаній відстані. Для довжин хвиль інфрачервоного випромінювання понад 4 мкм вона вказується як максимальна густина потужності (у Вт/м). Виробник несе відповідальність за правильну класифікацію лазера, а також за оснащення лазера відповідними застережливими етикетками та заходами безпеки відповідно до приписів. Заходи безпеки, що використовуються з потужнішими лазерами, включають керування за допомогою клавіш, сигнальні лампи, що вказують на випромінювання лазерного світла, зупинку променя або атенюатор і електричний контакт, який може підключити користувач до аварійної зупинки або блокування.

Нижче наведено основні характеристики та вимоги до системи класифікації, зазначені в стандарті IEC 60825-1, разом з типовими обов'язковими попереджувальними написами. Крім того, класи 2 і вище повинні мати показану тут трикутну попереджувальну етикетку, а в певних випадках потрібні інші етикетки, що вказують на лазерне випромінювання, лазерні отвори, небезпеки для шкіри та невидимі довжини хвиль. Для класів від I до IV див. розділ Стара система нижче.

Лазер Класу 1 безпечний за всіх умов нормальної експлуатації. Це означає, що максимально допустима експозиція (MPE) не може бути перевищена при перегляді лазера неозброєним оком або за допомогою типової оптики збільшувальної (наприклад, телескопа або мікроскопа). Для перевірки відповідності стандарт визначає апертуру та відстань, що відповідають неозброєному оку, типовому телескопу, що спостерігає колімований промінь, і типовому мікроскопу, що спостерігає розбіжний промінь. Важливо розуміти, що деякі лазери, класифіковані як клас 1, можуть продовжувати становити небезпеку при перегляді в телескоп або мікроскоп з досить великою апертурою. Наприклад, потужний лазер з дуже великим променем, що колімується, або дуже сильно розбіжним променем може бути класифікований як клас 1, якщо потужність, що проходить через отвори, визначені в стандарті, менше AEL для класу 1; однак небезпечний рівень потужності може бути отриманий оптикою збільшення з більшою апертурою. - Лазерні діоди класу 1 часто використовуються у приводах оптичних дисків.

Лазер класу 1M - це безпечний для всіх використовуваних засобів, пропускання через збільшувальну оптику, таку як мікроскопи та телескопи. Лазери класу 1M представляють промені великого діаметра або промені, що розходяться. MPE для лазера класу 1M зазвичай не може бути перевищений, якщо для звуження променя не використовується оптика, що фокусує або візуалізує. Якщо промінь перефокусовано, небезпека лазерів класу 1M може бути змінена. Лазер можна віднести до класу 1M, якщо потужність, яка може проходити через зіницю неозброєного ока, менша, ніж AEL для

класу 1, але потужність, яку можна зібрати в очі за допомогою типової оптики збільшення (як визначено в стандарті) вище, ніж AEL для класу 1 та нижче, ніж AEL для класу 3B.

Лазер класу 2 є безпечним, тому що рефлекс миготіння (реакція запобігання засліпленню на яскраве світло) обмежує експозицію не більше 0,25 секунди. Це стосується лише лазерів видимого світла (400–700 нм). Лазери класу 2 обмежують безперервною хвилею потужністю 1 мВт або більше, якщо час випромінювання менше 0,25 секунди або світло не є просторово когерентним. Умисне придушення рефлексу моргання може призвести до травмування ока. Деякі лазерні указки та вимірювальні прилади класу до класу 2.

Лазер класу 2M безпечний через рефлекс миготіння, якщо його не дивитися через оптичні прилади. Як і у випадку з класом 1M, це відноситься до лазерних променів з великою великою або великою розбіжністю, для якого кількість світла, що проходить через зіницю, не може бути меж для класу 2.

Лазер класу 3R вважається безпечним під час обережного поводження з обмеженим оглядом променя. З лазером класу 3R можна перевищити МДП, але з низьким ризиком травмування. Лазери безперервної дії видимого діапазону обмежені до 5 мВт. Для інших довжин хвиль і імпульсних лазерів застосовуються інші обмеження.

Лазер класу 3B небезпечний при прямому впливі на очі, але за наявності дифузних відбитків, наприклад, паперу або інших матеріалів. матові поверхні не шкідливі. AEL для безперервних лазерів у діапазоні довжин хвиль від 315 нм до інфрачервоної області становить 0,5 Вт. Для імпульсних лазерів між 400 і 700 нм межа становить 30 мДж. Інші обмеження застосовуються до інших довжин хвиль і лазерів з ультракороткими імпульсами. Захисні окуляри зазвичай потрібні там, де можливий прямий перегляд лазерного променя класу 3B. Лазери класу 3 повинні бути оснащені клавішним вимикачем та запобіжним блокуванням. Лазери класу 3B використовуються всередині

записуючих пристроїв CD і DVD, хоча сам записуючий блок відноситься до класу 1, тому що лазерне світло не може залишити пристрій.

Клас 4 - найвищий та найнебезпечніший лазерів, що перевищують AEL класу 3B. За визначенням, лазер класу 4 може обпалити шкіру або викликати руйнівне та необоротне ушкодження очей у результаті прямого, розсіяного чи непрямого огляду променя. Ці лазери можуть спалахнути горючі матеріали і, таким чином, надати небезпеку пожежі. Ці небезпеки можуть також ставитися до непрямих або недзеркальних променів, що відображають, навіть до явно матових поверхонь, а це означає, що необхідно дуже уважно стежити за траєкторією променя. Лазери класу 4 повинні бути перемикачем із ключем та захисним блокуванням. Більшість промислових, військових та медичних лазерів до цієї категорії. Медичні лазери повинні знати небезпечні відстані для очей (NOHD) та номінальну небезпеку для очей (NOHA).

Стара система

Зелений лазер – клас IIIb у порівнянні з класом IIIa

Класи безпеки в «старій системі» класифікації були встановлені на основі Штатів на основі узгоджених стандартів (ANSI Z136.1), а також федеральних нормативних актів і постанов штату. Міжнародна класифікація, описана в узгоджених стандартах, таких як IEC 825 (пізніше IEC 60825), була представлена на основі тих же концепцій, але представлені позначеннями, що трохи відрізняються від класифікації.

Ця система класифікації лише трохи відрізняється від вихідної системи, розробленої на початку 1970-х років. Він, як і раніше, використовується в правилах безпеки лазерних пристроїв. Зазначені значення потужності лазера є типовими. Класифікація залежить також від довжини хвилі та від того, чи є лазерним імпульсним чи безперервним. Для класів лазера від 1 до 4 см. Розділ зміненої системи є вищим.

Клас I

Винятково безпечний; немає можливості ушкодження очей. Це може відбуватися або через низьку вихідну потужність (у разі пошкодження очей навіть після кількох впливів), або через корпус, що перешкоджає доступу користувача до лазерного променя під час нормальної роботи, наприклад, у програвачі компакт-дисків або лазерних принтерів.

Клас II

Миготливий захисник людських (реакція огиди) протягом запобігає пошкодженню ока, якщо тільки людина не буде навмисно дивитися в промінь протягом тривалого періоду. Вихідна потужність може сягати 1 мВт. Цей клас включає тільки лазери, що випромінюють видиме світло. Деякі лазерні вказівки належать до цієї категорії.

Клас IIa

Область наприкінці класу II з низьким енергоспоживанням, де лазеру потрібно понад 1000 секунд безперервного перегляду, щоб викликати опік сітківки. До цього підкласу є комерційні лазерні сканери.

Клас IIIa

Лазери цього класу в основному змінюють діаметр променя або щільність потужності, хоча навіть без додаткових прямих оптичних з оком протягом двох хвилин може викликати серйозне пошкодження сітківки. Вихідна потужність не більша за 5 мВт. Щільність потужності променя не може перевищувати 2,5 мВт/см, якщо пристрій не позначений запобіжною етикеткою «Обережно», в небезпеці потрібна запобіжна етикетка «Небезпека». Багато лазерні приціли для вогнепальної зброї та лазерні указки, які зазвичай використовуються для презентації, до цієї категорії.

Клас IIIb

Лазери цього класу можуть спричинити пошкодження, якщо промінь потрапляє у око. Зазвичай це стосується лазерів потужністю 5–500 мВт. Лазери цієї категорії викликають незворотне пошкодження очей при експозиції 1/100 секунд або більше, залежно від потужності лазера. Дифузне відображення, як правило, не є небезпечним, але дзеркальні відображення можуть бути настільки ж небезпечними, як і прямі впливи. Рекомендується використовувати захисні окуляри, якщо можливе пряме спостереження променя лазерів класу IIIb. Лазери цього класу високої потужності також можуть побоюватися спалаху та легкого опіку шкіри.

Клас IV

Лазери цього класу мають вихідну потужність у промені понад 500 мВт і викликають серйозні незворотні ушкодження очей чи шкіри без фокусування за допомогою оптики ока чи приладів. Дифузне відображення лазерного променя може бути небезпечним для шкіри чи очей у межах номінальної небезпечної зони. (Номінальна небезпечна зона - це область навколо лазера, яка перевищує допустиме значення ПДВ.).

5.4. Загальні запобіжні заходи

Багато вчених, які працюють з лазерами, погоджуються з наступними рекомендаціями.

Кожен, хто використовує лазер, повинен знати ризики. Це не просто питання часу, проведеного з лазерами; Навпаки, тривала робота з невидимими ризиками (наприклад, від інфрачервоних лазерних променів), як правило, знижує поінформованість про ризики, а не загострює їх насамперед через самозаспокоєність.

Оптичні експерименти слід проводити на оптичний, при якому всі лазерні промені рухаються тільки в горизонтальній площині столу, і всі промені мають бути зупинені на краях столу. Користувачі ніколи не повинні класти очі на горизонтальній площині, де знаходяться промені, у разі відбитих променів, що залишають стіл.

Годинник та інші прикраси, які можуть потрапити в оптичну площину, не допускаються у лабораторії. Усі неоптичні об'єкти, розташовані близько до оптичної площини, повинні мати матову поверхню, що запобігає дзеркальним відображенням.

Якщо існує значний ризик травми, кожній кімнаті завжди повинен бути потрібний відповідний захист очей.

Промені високих рівнів, які можуть спричинити спалах або пошкодження шкіри (в основному, від лазерів класу 4 та ультрафіолетових) і які не часто модифікуються, повинні прямувати через непрозорі трубки.

Поєднання променів та оптичні компоненти можуть по можливості працювати зі зниженою потужністю променя.

Використання засобів захисту очей при роботі з лазерами класів 3В і 4 таким чином, що це може призвести до опромінення очей вище рівня MPE, потрібно на робочому місці Управлінням з охорони праці та здоров'я.

Захисні окуляри у вигляді оптики, що фільтрують, можуть захистити очі від відбитого або розсіяного лазерного світла з небезпечною потужністю променя, а також від ріжучого впливу лазерного променя. Окуляри повинні бути вибрані для конкретного типу лазера, щоб блокувати або послаблювати у відповідному діапазоні хвиль. Наприклад, окуляри, що поглинають 532 нм, зазвичай мають помаранчевий колір (при виборі лазерного захисту очей ніколи не слід покладатися тільки на колір лінз), що випромінюють довжину хвиль більше 550 нм. Такі окуляри були б марними як захист від лазерного випромінювання з довжиною хвилі 800 нм. Крім того, деякі лазери випромінюють світло за допомогою лазерів довжиною 532 нм, які зазвичай накачуються інфрачервоними лазерними діодами із довжиною хвилі 532 нм. хвилі 808 нм, а також генерує основний лазерний промінь 1064 нм, який використовується для отримання остаточного сигналу 532 нм. Якщо інфрачервоне випромінювання потрапляє в промінь, що відбувається в деяких зелених лазерних указках, воно, як правило, не блокується

звичайними червоними або оранжевими захисними окулярами, призначеними для чисто зеленого або вже пройшов ІЧ-фільтрацію променя. Для роботи з YAG-лазером з подвоєною здатністю та іншими ІЧ-лазерами, які мають видимий промінь, доступні спеціальні YAG-лазер та двочастотні окуляри, але вони дорожчі, а в зелених лазерних продуктах з ІЧ-накачуванням не завжди вказується, чи потрібна така додатковий захист.

Окуляри розраховані на оптичну щільність (OD), яка є десятковим логарифмом коефіцієнта ослаблення, на який оптичний фільтр знижує потужність променя. Наприклад, окуляри з OD 3 збільшують потужність променя у вказаному діапазоні довжин хвиль у 1000 разів. На додаток до оптичної щільності, достатньої для потужності променя до прямого рівня нижче максимально допустимої експозиції (див. вище), лазерні окуляри, які використовуються там, де можлива дія променя, витримуватиме пряме влучення лазерного променя, не ламаючись. Захисні характеристики (довжина та оптична щільність) зазвичай друкуються на окулярах, як правило, у верхній частині пристрою. Європейський стандарт EN 207 вимагає від виробників Європейської спільноти вказувати максимальну номінальну потужність, а не оптичну густину. Завжди надягайте захисні окуляри.

Блокування - це ланцюги, які зупиняють лазерний промінь, якщо якась умова не виконується, наприклад, якщо корпус лазера або двері кімнати відчинені. Лазери класів 3B і 4 зазвичай встановлюють з'єднання зовнішнього ланцюга блокування. Багато лазерів до класу 1 тільки тому, що світло знаходиться в замкнутому корпусі, наприклад, DVD-приводи або портативні програвачі компакт-дисків.

У деяких системах є електроніка, яка автоматично відключає лазер за інших умов. Наприклад, у деяких волоконно-оптичних системах зв'язку є кола, які автоматично відключають передачу при підключенні або обриві волокна.

Багато організаціях, керуючих лазерами, потрібно призначити офіцера лазерної безпеки (LSO). LSO відповідає за дотримання правил техніки безпеки всіма іншими працівниками в організації.

У період з 1999 по 2016 роки все більша увага приділялася ризикам, пов'язаним з так званими лазерними указками та лазерним пір'ям. Зазвичай, продаж лазерних покажчиків обмежена класом 3A (<5 mW) or class 2 (<1 mW), depending on local regulations. Для прикладу, в США, Канаді і Великобританії, клас 3A є максимальним розміром, не має керованого керування керуванням або іншими сферами особливостей. У Австралії клас 2 є максимально допустимим класом. Однак, оскільки дотримання вимог часто не дуже строго, часто доступні лазерні покажчики класу 2 і вище. для продажу навіть у країнах, де їх не дозволено.

Ван Норрен та ін (1998) не змогли знайти жодного прикладу в медичній літературі, коли лазер класу III потужністю <1 мВт призводив до пошкодження зору. Mainster et al.. (2003) наводять один випадок, 11-річна дитина, яка тимчасово пошкодила свій зір, утримуючи червону лазерну указку потужністю приблизно 5 мВт близько до ока і дивлячись на промінь протягом 10 секунд; у неї виникла худоба (сліпа пляма), але повністю одужав через три місяці. Luttrull Hallisey (1999) описують схожий випадок, коли 34-річний чоловік дивився на промінь червоного лазера класу IIIa потужністю 5 мВт протягом 30-60 секунд. викликавши тимчасову центральну худобу та втрату поля зору. Його зір повністю відновився протягом двох днів, час його перевірки зору. Внутрішньовенна флюоресцентна ангіограма очного дна - метод, який використовується офтальмологами для детальної візуалізації сітківки ока, виявила легку зміну кольору ямки.

Крім фізичного ушкодження ока лазером, можливі й інші небажані ефекти. До них відносяться короткочасна сліпота від спалаху, якщо промінь зустрічається у темряві, наприклад, під час руху вночі. Це може призвести до миттєвої втрати керування автомобілем. Лазери, спрямовані на літак, становлять небезпеку для авіації. Офіцер поліції, побачивши червону точку на грудях, може зробити висновок, що снайпер націлений на нього, і вдатися до агресивних дій. Крім того, повідомлялося, що рефлекс переляку, що виявляється деякими людьми, які несподівано піддавалися впливу

лазерного світла такого роду, призводив до самоушкодження або втрати контролю. З цих і подібних причин Управління з санітарного нагляду за якістю харчових продуктів та медикаментів повідомило, що лазерні указки не є іграшками і не повинні використовуватися неповнолітніми, крім під безпосереднім наглядом дорослих.

Безпека волоконно-оптичних лазерів характеризується тим, що при нормальній роботі світловий промінь недоступний, тому щоб він став доступним, необхідно щось відключити або зламати. Результиуючий вихідний пучок сильно розходитьься, тому безпека очей залежить від відстані і використання збільшувального пристрою.

Насправді випадкове вплив на переважна більшість встановлених систем навряд чи вплине на здоров'я, оскільки рівні потужності зазвичай нижче 1 мВт, а довжина хвилі в інфрачервоному діапазоні, наприклад Клас 1. Однак є кілька істотних винятків.

Більшість одномодових/багатомодових волоконних систем фактично використовують інфрачервоне світло, невидиме для людського ока. І тут немає реакції огиди очей. Особливим випадком є системи, що працюють на довжині хвилі 670-1000 нм, де промінь може здаватися тьмяно-червоним, навіть якщо світловий промінь насправді дуже інтенсивний. Технічні фахівці можуть використовувати червоні лазери для пошуку несправностей на довжині хвилі 628-670 нм. Вони можуть створити значну небезпеку під час неправильного перегляду, особливо якщо вони мають надмірно високу потужність. Такі виявники видимих ушкоджень зазвичай класифікуються класом 2 до 1 мВт і класом 2М до 10 мВт.

Оптичні підсилювачі великої потужності використовуються у системах великої дальності. У них використовуються лазери з внутрішнім накачуванням потужністю до декількох ват, що є серйозною небезпекою. Однак ці рівні потужності містяться у модулі підсилювача. Будь-яка система, в якій використовуються типові оптичні роз'єми (тобто не розширений промінь), зазвичай не може перевищувати приблизно 100 мВт, при перевищенні якого рівень потужності одномодових роз'ємів стає ненадійним, тому якщо в системі є одномодовий роз'єм, розрахунковий рівень потужності завжди буде нижче за

цей рівень, навіть якщо інші подробиці невідомі. Додатковим фактором для цих систем є те, що світло в діапазоні довжин хвиль 1550 нм (загальне для оптичних підсилювачів) вважається низьким ризиком, оскільки очні рідини поглинають світло до того, як воно фокусується на сітківці. Це знижує загальний чинник ризику таких систем.

Оптичні мікроскопи та збільшувальні пристрої також є унікальними проблемами безпеки. Використовується будь-яка оптична сила для використання в тканинах, щоб користувач не захищений розбіжністю, оскільки промінь може бути відображений на око. Тому в таких ситуаціях ніколи не слід використовувати прості збільшувальні пристрої. Доступні інспекційні мікроскопи з оптичними роз'ємами, які включають фільтри, що блокують, що значно підвищує безпеку очей. Сама остання конструкція також включає захист від лазерів з локалізацією червоних пошкоджень.

Хоча більша частина небезпеки лазерів походить від самого променя, існують інші небезпеки, які часто пов'язані з використанням лазерних систем. Багато лазерів є високовольтні лазери, зазвичай 400 Вгору для невеликого імпульсного лазера 5 мДж і перевищують багато потужних кіловольт в більш потужних лазерах. Це в поєднанні з водою під високим тиском для охолодження лазера та іншого пов'язаного з ним електричного обладнання може створити більшу небезпеку, ніж лазерний промінь.

Як правило, електричне обладнання слід встановлювати на висоті не менше 250 мм (10 дюймів) над підлогою, щоб знизити ризик ураження електричним струмом у разі затоплення. Оптичні столи, лазери та інше обладнання мають бути добре заземлені. При пошуку та усуненні несправностей необхідно дотримуватись блокування корпусу та вживати особливих запобіжних заходів.

Крім небезпеки ураження електричним струмом, лазери можуть створювати хімічні, механічні та інші небезпеки, характерні для конкретних установок. Хімічні небезпеки можуть включати матеріали, властиві лазеру, такі як оксид берилію в лазерних трубках з іонами аргону, галогени в ексимерних лазерах, органічні барвники, розчинені в токсичних або легкозаймистих розчинниках в лазерах на барвниках, а також пари

важких металів і азбестова ізоляція кадмієвих лазерів. Вони також можуть включати матеріали, що виділяються під час лазерної обробки, такі як пари металу при різанні або обробці поверхні металів, або складна суміш продуктів розкладання, що утворюються у високоенергетичній плазмі лазерного різання пластмас.

Механічні небезпеки можуть включати рухомі частини вакуумних та нагнітальних насосів; вибух або вибух ламп-спалахів, плазмових трубок, водяних сорочок та газового обладнання.

Високі температури та небезпека загоряння можуть виникнути внаслідок роботи потужного лазера класу IIIВ або будь-якого лазера класу IV.

У комерційних лазерних системах заходи зниження ризику, такі як наявність плавких заглушок, теплових переривників і запобіжних клапанів, знижують небезпеку наприклад, паровий вибух через засмічення сорочки водяного охолодження. Блокування, віконниці та сигнальні лампи часто є критичними елементами сучасних комерційних об'єктів. У більш старих лазерах, експериментальних та аматорських системах, а також тих, що зняті з іншого обладнання (ОЕМ-блоки), необхідно виявляти особливу обережність, щоб передбачати та зменшувати наслідки неправильного використання, а також різних режимів відмови.

5.5. Екологічність

Протягом багатьох років авіаційна галузь несе відповідальність за надмірний негативний вплив на зміну клімату. Більшість процесів, від створення до експлуатації, вплинули на екологічну нестійкість. Незважаючи на впровадження різноманітних технологічних підходів у галузі, вплив на навколишнє середовище залишається значним.

Згідно з даними Міжнародної ради з екологічно чистого транспорту (ICCT), авіаперевезення спричиняють близько 3% світових викидів вуглекислого газу, і це одне з джерел парникових газів, яке найшвидше зростає. «Найменше шкідливий політ — це той, якого взагалі не відбувається», — каже Микита Павленко, старший дослідник

палива ІССТ. Ця порада непрактична для людей, яким потрібно подорожувати на великі відстані, або для авіаперевізників. Але кліматологи кажуть, що для того, щоб контролювати зміни клімату, авіакомпанії повинні скоротити свої викиди.

Кілька авіакомпаній оголосили про програми, щоб спробувати стати більш стійкими в найближчі роки. Delta Air Lines нещодавно виділила 1 мільярд доларів США, щоб стати вуглецево-нейтральною до 2030 року. JetBlue пообіцяла досягти цього до 2040 року, а United Airlines – до 2050 року. Багато інших глобальних авіакомпаній по всьому світу дали подібні обіцянки.

Але зробити авіасполучення більш стійким непросто. Щоб підняти людей і вантажі в повітря і перенести їх на великі відстані, потрібно багато енергії. Авіакомпанії намагаються зменшити викиди кількома способами. Ймовірно, найпоширенішим є перехід від традиційного реактивного палива, отриманого з викопного палива, до такого, яке виготовляється з відновлюваних джерел і має менші викиди під час виробництва. Авіакомпанії також шукають нові матеріали та технології покриття, щоб зробити літаки легшими, аеродинамічнішими та стійкішими до зносу. Тим часом кілька авіакомпаній, наприклад United, вважають, що зможуть досягти вуглецевої нейтральності, відновивши надзвукові польоти.

Викиди від спалювання реактивного палива становлять значну частину впливу комерційних авіакомпаній на навколишнє середовище. Авіакомпанії намагаються зменшити це за допомогою альтернативних видів палива

Сміття рухається конвеєром на заводі Fulcrum BioEnergy із переробки сміття на паливо, готове до переробки на авіаційне паливо. Fulcrum планує розпочати виробництво біопалива в останньому кварталі цього року на цьому заводі на схід від Ріно, і компанія планує створити ще вісім.

Коли керівники авіакомпаній думають про те, як зробити авіаперевезення більш стійкими, найбільша стрілка вказує на паливо, яке спалюється, щоб утримувати літаки в

повітрі. «Що стосується короткомагістральних рейсів, є певний обнадійливий рух для літаків з нульовим рівнем викидів, таких як ті, що працюють на електриці», — каже Павленко. «Але все інше залежить від того, на яке паливо ви можете перейти».

Метою використання стійкого авіаційного палива, або SAF, є зменшення кількості парникових газів, що викидаються протягом усього терміну служби палива, від виробництва до згоряння, порівняно з поточним нафтовим реактивним паливом. Масштаб цього скорочення залежить від процесу виробництва палива та джерела вуглецю. І навіть незважаючи на те, що деякі SAF можуть похвалитися значним скороченням викидів, лише деякі з них виготовляються у великих масштабах.

Щоб зробити синтетичний парафіновий гас Фішера-Тропша, промислові хіміки окислюють джерело вуглецю до синтез-газу, суміші монооксиду вуглецю та водню, а потім пропускають цей газ над залізним, кобальтовим або рутенієвим каталізатором для отримання вуглеводнів. Потім вони змішують продукти з вичопним реактивним паливом, перш ніж результат спалить у реактивному двигуні.

Як правило, комерційні авіалайнери використовують гасове паливо під назвою Jet A і Jet A-1. Вони являють собою суміші парафінів, нафтенів, ароматичних сполук і олефінів, які в основному отримують з нафти. Деякі компанії, такі як Airbus, яка відмовилася давати інтерв'ю для цієї історії, шукають водень як паливо, оскільки при згорянні утворюється водяна пара. Але розробка двигунів, що спалюють H₂, знаходиться на початковій стадії, тому такі літаки ще далеко в майбутньому.

Більшість компаній натомість шукають альтернативне паливо або паливо, яке може працювати з існуючими реактивними двигунами. Вони повинні мати властивості, подібні до реактивного палива, включаючи енергію, що виділяється при спалюванні, продуктивність при низьких температурах і потік. Ці специфікації гарантують, що паливо поводитиметься так само, як реактивне паливо, отримане з копалин, у двигуні

літака. За його словами, один із способів виробників палива отримати SAFs, що відповідають цим специфікаціям, це змішування їх зі звичайним реактивним паливом.

Існує три основних способи виготовлення SAF: із гідрооброблених ефірів і жирних кислот (HEFA), синтетичного парафінового гасу Фішера-Тропша (FT-SPK) і синтетичного парафінового гасу спирту до струменів (ATJ-SPK). Усі три можна використовувати з однаковими рівнями суміші, близько 50%.

Щоб виробляти паливо HEFA, промислові вчені видаляють кисень із молекул невикористаних рослинних олій або відпрацьованих жирів, масел і жирів. Потім вони обробляють суміші воднем, щоб отримати горючі вуглеводні потрібної довжини для реактивного палива, зазвичай від 10 до 20 атомів вуглецю, згідно з ICCT. У порівнянні з Jet A і Jet A-1 це паливо є найбільш конкурентоспроможною технологією SAF.

Щоб зробити Fischer-Tropsch-SPK, вчені окислюють широкий спектр рослинних і людських відходів і залишків для отримання синтез-газу, суміші H₂ і монооксиду вуглецю. Додавання каталізатора — зазвичай заліза, кобальту або рутенію — до цього газу запускає синтез Фішера-Тропша, який виробляє вуглеводні.

Джерелами спирту до реактивного SPK є такі культури, як цукрова тростина та кукурудза, рослинні та сільськогосподарські відходи, а в деяких випадках промислові димові гази. Як правило, вчені перетворюють цю сировину на етанол або ізобутиловий спирт, а потім модернізують спирти до довголанцюгового гасу, видаляючи воду, обробляючи їх воднем і об'єднуючи коротколанцюгові вуглеводні, щоб утворити довші.

Ці три види альтернативного палива не мають однакового впливу на навколишнє середовище. Нещодавно ICCT опублікував звіт, у якому показано кількість парникових газів, що викидаються протягом життєвих циклів різних видів альтернативного палива, включаючи вирощування або збирання джерел вуглецю, синтез палива та його спалювання в двигуні. Дані надійшли з програми Міжнародної організації цивільної

авіації «Схема компенсації та скорочення викидів вуглецю для міжнародної авіації», розробленої ООН.

ICST виявив, що паливо типу спирт-реактивний SPK, як правило, має вищі викиди, ніж паливо HEFA або Fischer-Tropsch-SPK, оскільки виробництво спирту з крохмальних культур потребує багато енергії та викидає значну кількість парникових газів. Загалом біопаливо, вироблене з відходів і побічних продуктів, як правило, має нижчі викиди парникових газів, ніж рослинне.

Жодна паливна компанія наразі не виробляє SPK, тому паливо, яке зараз виробляється з найнижчими викидами парникових газів протягом усього терміну служби, – це HEFA, залежно від сировини. «Деякі SAF насправді не пропонують дуже багато, якщо взагалі пропонують, економію парникових газів, наприклад біопаливо, отримане з пальмової олії, тоді як інші можуть мати скорочення парникових газів, що наближаються до 100%». За його словами, використана кулінарна олія та відходи тваринного жиру мають менші викиди протягом усього терміну експлуатації та є більш популярними, ніж пальмова олія.

Компанія Fulcrum ViEnergy, яка є найближчою до комерційного виробництва Fischer-Tropsch-SPK, розташована в Плезантоні, Каліфорнія. Технологія цієї компанії використовує тверді побутові відходи, також відомі як сміття, для виготовлення авіаційного палива. За словами віце-президента Баррази, Fulcrum планує розпочати виробництво біопалива в останньому кварталі цього року на своєму заводі на схід від Ріно, штат Невада. За словами Баррази, компанія планує побудувати вісім інших заводів із загальним виробництвом близько 1,5 мільярда літрів на рік, що достатньо для задоволення потреб United та інших партнерів, серед яких Cathay Pacific Airways і Japan Airlines.

Використання твердих побутових відходів як сировини для реактивного палива може забезпечити значну економію викидів парникових газів. Як правило, розкладання твердих побутових відходів на звалищах утворює метан, який за 100 років має більш ніж

у 28 разів більший вплив на зміну клімату, ніж CO₂. «Відводячи [тверді побутові відходи] зі сміттєзвалища, ми тим самим запобігаємо утворенню всього цього метану», — каже Барраза. Загальний аналіз життєвого циклу парникових газів для палива з твердих побутових відходів показує, що цей шлях може зменшити викиди парникових газів більш ніж на 85% порівняно з викопним паливом. Але головне в тому, що компанія повинна спочатку видалити пластикові відходи зі смітника.

Пластик, який лежить на звалищі, фактично є формою зберігання вуглецю. «Але якщо ви перетворюєте його на паливо та спалюєте, той вуглець, який довгий час безпечно перебував у землі, тепер він знаходиться в атмосфері», — каже він. Барраза каже, що сировиною для відходів, яку використовує компанія, є переважно органічний або біогенний матеріал.

Але реальність така, що щодо загальної кількості реактивного палива авіакомпанії зараз не використовують багато SAF. «Це менше 0,1% у всьому світі», — каже Павленко. Наприклад, за останні роки компанія United використовувала приблизно 3,8 мільйона літрів SAF на рік у порівнянні з понад 15 мільярдами літрів на рік звичайного реактивного палива, каже Робінсон. За його словами, щоб збільшити кількість SAF, до яких вона має доступ, United уклала угоди з Fulcrum і World Energy. Delta і JetBlue мають угоди про закупівлю SAF у фінської компанії Neste. Ці угоди дають авіакомпаніям впевненість у ціні та джерелі майбутнього палива, а паливним компаніям — майбутній ринок для їх продукції.

Матеріали, які використовуються в кожній частині літака, можуть визначати його вагу, аеродинаміку та стійкість до зношування та розриву в атмосфері. Те, з чого виготовлені ці матеріали та нанесені на них покриття, і як вони працюють, може значно вплинути на вплив літака на навколишнє середовище. Зараз компанії та дослідники досліджують легші та менш токсичні матеріали та покриття для більш стійких літаків майбутнього.

Кожна частина літака потребує покриття для покращення її функціонування. Ось кілька прикладів зовні та всередині літака.

1. Вікна кабіни: на додаток до термо- та ультрафіолетового покриття, вікна кабіни покриті електропровідним оксидним матеріалом. Пілоти можуть подавати напругу на матеріал, щоб розтопити лід із вікон, заощаджуючи час на розморожування та зменшуючи затримки.
2. Двигуни: температура в камері згоряння реактивного двигуна може досягати майже 1400 °С, а нові, ефективніші двигуни потребують ще вищих температур стиснення палива та згоряння. Усі деталі двигунів літаків покриті матеріалами, часто керамікою, щоб допомогти їм протистояти цим екстремальним навантаженням.
3. Фюзеляж: зовнішні частини літаків потребують таких покриттів, як хром, щоб протистояти іржі, і поліуретану та акрилу, щоб захистити від пошкоджень ультрафіолетовим світлом і покращити аеродинаміку. Покриття також використовуються для додавання логотипів авіакомпаній на літаки.
4. Пасажирські вікна: вікна мають покриття з пластику та розтягнутого акрилу, щоб зробити їх стійкими до тепла та ультрафіолету. Нова технологія в розробці може додати електрохромний шар. Це дозволить пасажирам затемнювати вікна, усуваючи потребу у шторах.
5. Шасі: захист від іржі та стійкість до ударів особливо важливі для шасі, критичних частин літака, які повинні витримувати суворі умови та інтенсивні навантаження. Покриття для шасі включають хром; твердий алмазоподібний вуглець; і анодовані метали.
6. Пасажирські сидіння. Частини всередині літака, які пасажирів не бачать, наприклад механізм, який дозволяє пасажирам відкидати сидіння, також потребують покриття, щоб допомогти їм протистояти тертю та зносу.
7. Столи з підносами. Пластикові столи з підносами покриваються для запобігання появі плям від їжі, знищення вірусів і бактерій і захисту від пошкоджень від засобів для чищення, які використовуються 10–15 разів на день. Ці полімерні матеріали мають

вбудовані наночастинки або оброблені антипригарними покриттями та сполуками четвертинного амонію.

Вага літака суттєво впливає на його вуглецевий слід, оскільки легшим літакам для роботи потрібно менше палива, а менше спаленого палива означає менші викиди. Один із способів зробити літаки легшими — змінити те, з чого вони зроблені.

Історично літаки виготовлялися з металу, як правило, алюмінієвого сплаву. Тепер деякі нові літаки, такі як Boeing 787 і Airbus A350, приблизно на 55% складаються з композитних матеріалів. Композит — це все, що складається з двох або більше матеріалів. Наприклад, деякі компанії виготовляють крила, хвости та частини фюзеляжу літаків із застосуванням полімерів із вуглецевими чи скляними волокнами. Композитні матеріали можуть зменшити вагу літаків до 20%.

«Якщо в алюмінієвий літак, як-от 747, влучає блискавка, блискавка проходить прямо через обшивку літака, завдаючи мінімальної шкоди або не завдаючи жодної шкоди». Але більшість композитних матеріалів, які використовуються в літаках, самі по собі не є електропровідними, тому прямий удар може завдати серйозної шкоди. Щоб захиститися від цього, виробники літаків, як-от Boeing і Airbus, накладають мідну сітку на фюзеляж своїх композитних літаків, але цей шар збільшує вартість і вагу. Щоб покращити електропровідність і дозволити літакам позбутися важкого шару міді, вчені розробляють армовані композити з нанографеном або вуглецевими нанотрубками та провідними полімерами.

Отже, під лазерної безпекою розуміється сукупність технічних, санітарно-гігієнічних та організаційних заходів, що забезпечують безпечні умови праці персоналу при використанні лазерних установок.

ВИСНОВКИ

Лазерна віброметрія – сучасний якісно новий рівень вимірювання параметрів механічних коливань об'єктів. Унікальні фізичні особливості лазерних методів визначають багато їх 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 оперативне вимірювання вібрацій у різних точках об'єкта у небезпечній для персоналу зоні (хімічно агресивній, з високою температурою, радіацією тощо).

Лазерний віброметр призначений в першу чергу для дистанційного вимірювання віброшвидкості об'єкта, що досліджується, або його частини в межах від 0,01 до 50 мм/с на віброчастотах від 80 Гц до 11 кГц з можливістю розширення діапазону віброчастот у бік низьких частот до 10 Гц. Вимірювальна дистанція від лазерного віброметра до об'єкта, що випробувається, становить від 1,5 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 зсуві 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, роблять 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 дисплеї.

До складу портативного лазерного віброметра входить персональний кишеньковий комп'ютер (КПК). Він у графічному вигляді відображає результати вимірів на дисплеї; керує 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 спектру 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 каналами RS-232 або USB, що дає можливість включати лазерний віброметр в автоматизовані вимірювальні системи.

До складу лазерного віброметра входять оптична система, що формує квадратурні складові доплерівського сигналу, та електронна система.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Иванов И. О. Измерение вибрации двигателей на воздушных судах : Учебное пособие / И. О. Иванов — К. : КИИГА, 1991. — 32 с.
2. Клочков Б. Н. Волновые и вибрационные процессы в машиностроении : Тез. докл. Всесоюзн. конф. / ИПФ АН СССР. Горький, 1989. ч. 2, С. 23-24.
3. Ножницкий Ю. А. Отраслевая экспериментальная база прочностных исследований авиационных двигателей // сб. докладов ВНТК «Метрологическое обеспечение испытаний и измерений в авиационно-космической промышленности». / Ю. А. Ножницкий, Б. А. Балугев. — М. : 2013. С. 76—87.

4. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин — М. : Машиностроение, 2000. — 344 с.
5. Александров А. А. Вибрация и вибродиагностика судового энергетического оборудования / А. А. Александров, А. В. Барков, Н. А. Баркова, В. А. Шаффинский. — Л. : Судостроение, 1986. — 276 с.
6. Коллакот Р. А. Диагностирование механического оборудования / А. Р. Коллакот. — Л. : Судостроение, 1980. — 296 с.
7. Сиротин Н. И. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Н. И. Сиротин, Ю. М. Коровкин. — М. : Машиностроение, 1979. — 277 с.
8. Ушаков А. П. Применение лазерной вибродиагностики в процессе стендовых испытаний агрегатов авиационной техники [Текст] / А.П. Ушаков, А.В. Озеров, А.Ю. Калеменин, П.А. Хабаров // Межвуз. Темат. Сб. научных трудов «Проблемы эксплуатации и совершенствования транспортных систем». — СПб., 2009. — Том XI. — С. 5-15.

9. Журавлев О. А. Лазерная виброметрия механических конструкций: учеб. пособие / О. А. Журавлев и др. — Самара : Изд-во Самара, рос. аэрокосм. ун-та, 2006. — 72 с.
10. Технология лазерного сканирования в съёмке промышленных объектов / . М. : проспект НПП «Навгеоком», 2007.
11. Сосновский А. А. Авиационная радионавигация : справочник / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович. — Москва : Транспорт, 1980. — 219 с.
12. Застрогин Ю.Ф. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования / Ю.Ф. Застрогин, О.Ю. Застрогин, А.З. Кулебякин — М. : Машиностроение, 1995. — 320 с.
13. Петрухин В. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. — М. : Инфра-Инженерия, 2010. — 176 с.