

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЇ.....	7
1.1 Класифікація вимірювальних перетворювачів вібрації.....	7
1.2 Інерційні методи вимірювання вібрації.....	9
1.3 Магнітоіндукційні перетворювачі.....	12
1.4 П'єзоелектричні перетворювачі.....	17
РОЗДІЛ 2 ОСНОВИ ЛАЗЕРНОЇ ВІБРОМЕТРІЇ.....	19
2.1 Основи лазерної віброметрії.....	19
РОЗДІЛ 3 СХЕМА ЛАЗЕРНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ...26	
3.1 Лазер.....	30
3.1.1 Принцип дії лазера.....	31
3.1.2 Активна речовина лазера.....	34
3.1.3 Резонатори.....	37
3.2 Оптичні датчики.....	38
3.2.1 Фотодіоди.....	39
3.2.2 Конвертер світло-напруга.....	42
3.3 Частотний детектор.....	46
3.4 Інтегратор.....	48
3.5 ЦАП з USB інтерфейсом.....	50
3.6 Основні положення, що враховуються при конструюванні.....	50
3.7 Програмні аналізатори спектра.....	53
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	63
4.1 Перелік небезпечних та шкідливих виробничих факторів при технічній експлуатації.....	64
4.2 Інструкція з охорони праці під час експлуатації проектного об'єкту.....	67

4.2.1 Основні положення.....	67
4.2.2 Вимоги безпеки перед початком роботи.....	68
4.2.3 Вимоги безпеки під час роботи.....	68
4.2.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи.....	70
4.2.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	70
РОЗДІЛ 5 ЛАЗЕРНА БЕЗПЕКА.....	71
5.1 Визначення параметрів лазерного пучка.....	74
5.1.1 Співвідношення енергетичних і просторових параметрів лазерного пучка.....	76
5.1.2 Параметри лазерного пучка перетвореного оптичною системою.....	79
5.2 Допустимі рівні лазерного випромінювання на очі і шкіру.....	82
5.3 Засоби захисту від лазерного випромінювання.....	84
Висновок.....	86
Список використаної літератури.....	88

ВСТУП

Для забезпечення безпеки польотів, виявлення дефектів на ранніх стадіях їх виникнення, своєчасного вжиття заходів щодо запобігання поломкам обладнання та авіаційних подій необхідно знати причини появи тих чи інших дефектів, здійснювати досить точне і достовірне вимірювання значень фізичних величин, що визначають стан авіаційної техніки.

Істотний вплив на технічний стан авіаційного обладнання, двигуна і повітряного судна в цілому має вібрація, що виникає при роботі авіадвигуна та приладів. При вібрації збільшується навантаження на опори, деталі й вузли, на елементи кріплення повітряного судна, що веде до підвищення їх зносу, зниження їх міцності і надійності, до зменшення ресурсу приладів та двигуна, руйнування елементів конструкції двигуна або повітряного судна.

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

РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЇ

1.1 Класифікація вимірювальних перетворювачів вібрації

У віброметрії використовують два принципи вимірювання: динамічний і кінематичний. Динамічний принцип вимірювання реалізується в давачах інерційної дії. При цьому вимірюються абсолютні значення параметрів вібрації досліджуваних об'єктів.

Кінематичний принцип вимірювання використовується в безконтактних давачах. При цьому вимірюється зміна в часі координат точок досліджуваних об'єктів щодо вібраційної нерухомої системи координат. Класифікація давачів абсолютної вібрації по використуваним для перетворення фізичним принципам (рис. 1.1). Класифікація давачів відносної вібрації відповідно до використуваних для перетворення фізичних принципів (рис. 1.2)

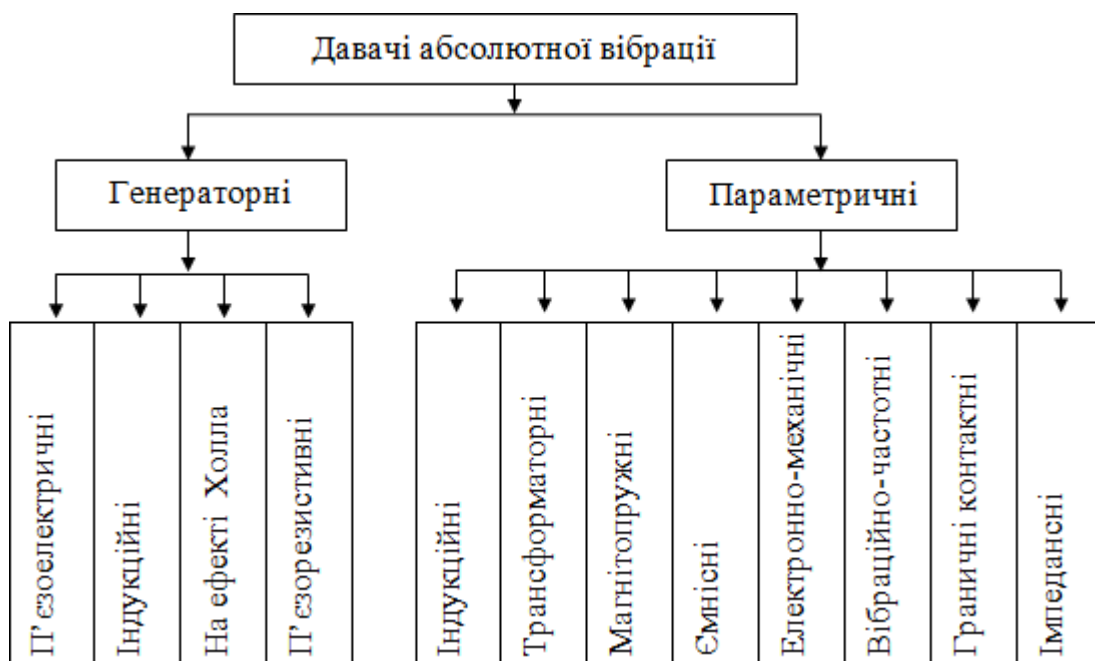


Рисунок 1.1 Класифікація давачів абсолютної вібрації по використуванім для перетворення фізичним принципам.

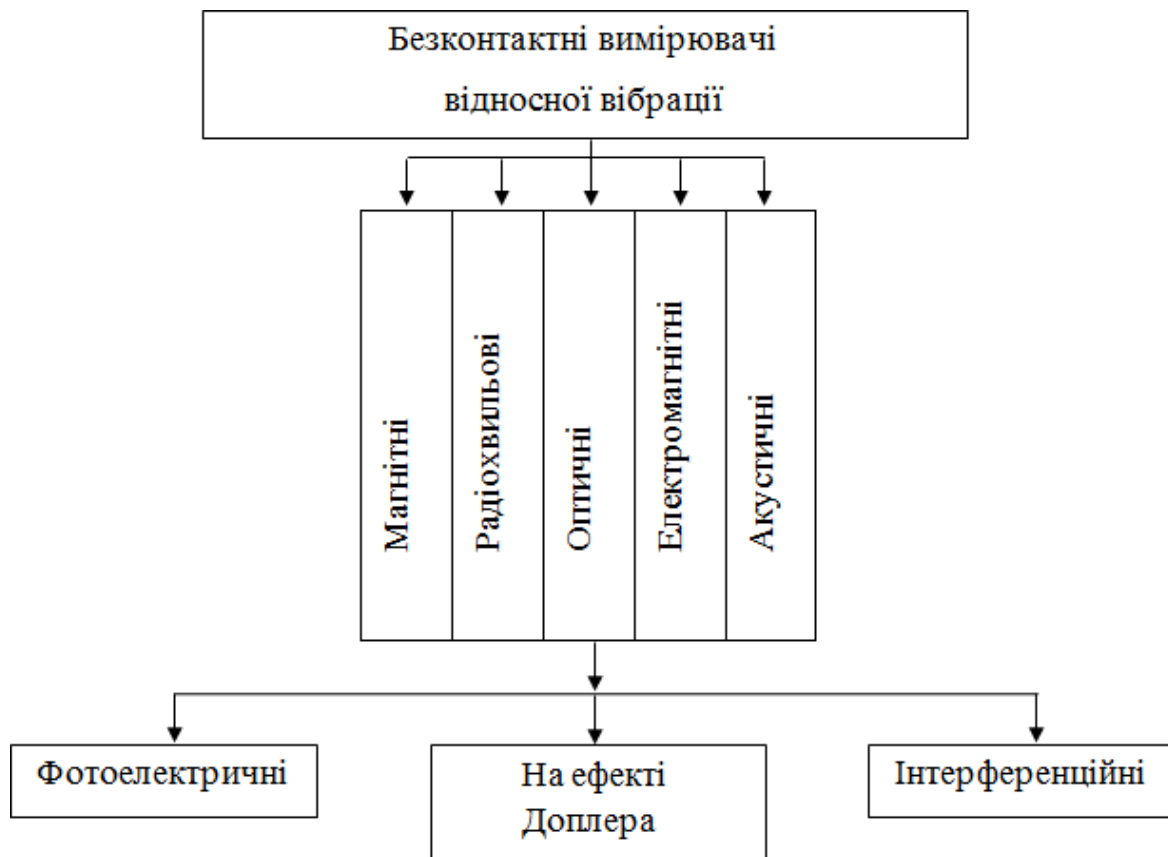


Рисунок 1.2 Класифікація давачів відносної вібрації відповідно до використовуваних для перетворення фізичних принципів.

З рис. 1.2 видно, що перетворювачі абсолютної вібрації в електричний сигнал діляться на два класи: генераторні, що перетворюють енергію механічних коливань в електричну; параметричні, що перетворюють механічні коливання в вимірювання параметрів електричних кіл, наприклад, індуктивності, ємності, активного опору, частоти або зсуву фаз і так далі.

З давачів абсолютної вібрації найбільшого поширення набули п'єзоелектричні давачі. Їх відрізняють малі габаритні розміри, широкі частотний і динамічний діапазони, незначні коефіцієнти впливу зовнішніх факторів: магнітного і електричного полів, звукового тиску, деформації досліджуваного об'єкта.

Принцип дії п'єзоелектричних давачів заснований на використанні прямого п'єзоелефекту, що полягає в тому, що під дією зовнішньої сили, в тому

числі знакозмінної, деякі кристали або п'єзокераміки генерують електричні заряди. Найбільш поширеними п'єзоелектричними матеріалами є кварц,

турмалін, ніобат літію, цирконат титаната свинцю, титанат вісмуту, окис цинку та ін.

Одним з основних факторів, що обмежують застосування п'єзоелектричних давачів, є температура, при якій вони експлуатуються. При перевищенні певної межі температури п'єзоелектричний елемент втрачає частину своєї поляризації і коефіцієнт перетворення давача знижується. При досягненні точки Кюрі матеріалу п'єзоелемента поляризація повністю зникає і давач виходить з ладу. В області низьких температур обмеження на застосування п'єзоелектричних давачів визначаються можливістю розтріскування п'єзоелектричного матеріалу. Слід враховувати, що давач повинен надавати мінімальний вплив на віброуючий об'єкт. Резонансна частота об'єкта змінюється під впливом маси давача.

В безконтактних вимірювачах найбільше застосування в вібродіагностиці знайшли оптичні методи і засоби вимірювання параметрів вібрації, які за способом виділення інформації про вимірюваний параметр ділять на амплітудні та частотні. До амплітудних методів вимірювань відносять фотоелектричні (або фотомодуляційні) і інтерференційні методи вимірювання. Вимірювання параметрів вібрації, засноване на зміні частоти випромінювання, відбитого від об'єкта, проводять вимірювальними пристроями, дія яких заснована на використанні ефекту Допплера

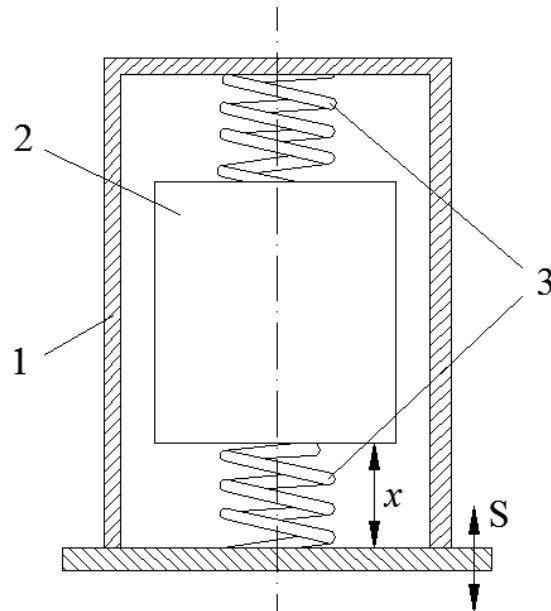
1.2 Інерційні методи вимірювання вібрації

Вібрацію об'єкта можна визначати, спостерігаючи його положення щодо інших об'єктів, які вважаються нерухомими. Розрізняють абсолютний і інер-

ційний методи вимірювання вібрації в залежності від того, щодо якого об'єкта

проводять виміри.

При вимірюванні вібрації абсолютним методом вібропереміщення спостерігають відносно світового простору (зірок). В авіації цей метод застосувати дуже складно, так як переміщення повітряного судна щодо світового простору в багато разів перевищує вібропереміщення.



Інерційний метод вимірювання вібрації авіадвигунів знайшов широке застосування. Цей метод заснований на першому законі Ньютона — властивості тіла зберігати стан спокою, коли на нього не діють сили.

Рисунок 1.3 — Конструкція вібровимірювального перетворювача

Вібровимірювальний перетворювач (ВВП), який реалізує інерційний метод вимірювання (рис. 1.3), складається з корпусу 1 (вібруючого елемента), жорстко з'єднаного з авіадвигуном, і інерційної маси 2 (невібруючого елемента), з'єднаної з корпусом 1 пружинами 3. Таким чином, при вібрації двигуна буде переміщуватися корпус 1 ВВП, а інерційна маса 2 завдяки своїй інерції буде залишатися відносно нерухомою. Отже, ВВП перетворює вхідний сигнал - вібропереміщення S корпусу 1 (а, значить, і авіадвигуна) щодо світового простору, в вихідний сигнал — переміщення x корпусу ВВП відносно інерційної маси 2 (сейсмомаси).

Рух такої коливальної системи описується виразом

$$\ddot{x} = 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -\ddot{S},$$

Де $\beta = \frac{\delta}{2\sqrt{cm}}$ коефіцієнт відносного загасання; δ — коефіцієнт демпфірування, кг/с;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$ власна кругова частота, 1/с; C — жорсткість пружин,

Н/м; m — маса невібруючого елемента, кг.

Коефіцієнт передачі такої системи описується виразом:

$$\eta = \frac{\gamma^2}{1-\gamma^2+j^2\beta\gamma},$$

Залежність модуля коефіцієнта передачі ВВП від співвідношення частот вимушених (вібраційних) і власних коливань системи називається амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) ВВП

На рис 1.4 показана АЧХ ВВП з різним коефіцієнтом загасання

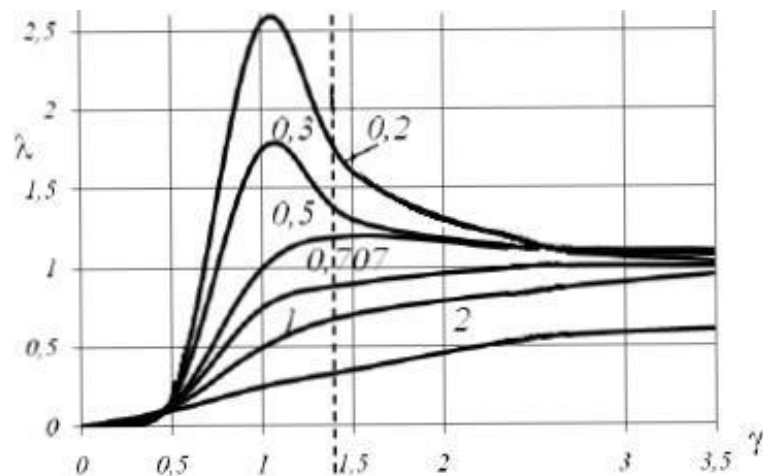


Рисунок 1.4 — АЧХ ВВП з різним коефіцієнтом загасання

З АЧХ ВВП видно, що при $\gamma \gg 1$ модуль коефіцієнта передачі ВВП наближається до одиниці. Отже, при $\gamma \gg 1$ переміщення корпусу ВВП щодо невібруючого елемента дорівнюватиме вібропереміщенню. Тому вважають, що при $\gamma > 1,5$ розглянутий ВВП працює в режимі перетворення вібропереміщення, при $\gamma < 0,5$ — перетворення віброприскорення, а при $0,5 < \gamma < 1,5$

— перетворення віброшвидкості. Для забезпечення $\gamma > 1,5$ необхідно застосовувати пружини малої жорсткості, а для $\gamma < 0,5$ — великої жорсткості.

Виготовлення ВВП з $0,5 < \gamma < 1,5$ досить важко, тому зазвичай створюють ВВП або з $\gamma < 0,5$ або з $\gamma > 1,5$.

Для отримання дистанційних віброметрів необхідно переміщення корпусу ВВП щодо невібруючого елемента перетворити в електричний сигнал. Для цього використовують магнітоіндукційні (МІП) і п'єзоелектричні (ПЕП) перетворювачі.

1.3 Магнітоіндукційні перетворювачі

Перше повномасштабне застосування отримали давачі вібрації з МІП (рис 1.6).

Його структурна схема зображена на рис. 1.5.

У таких давачах невібруючий елемент 2 являє собою циліндричний постійний магніт, намагнічений вздовж утворюючої, а індукційна котушка 3 жорстко з'єднується з корпусом. Таким чином, корпус і магніт утворюють ВВП, а магніт і котушка — МІП, на виході якого при вібрації виникає ЕРС (E). Розглянемо більш детально давач вібрації з МІП.

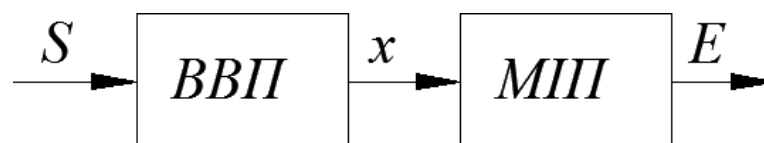


Рисунок 1.5 — Структурна схема давача вібрації з МІП

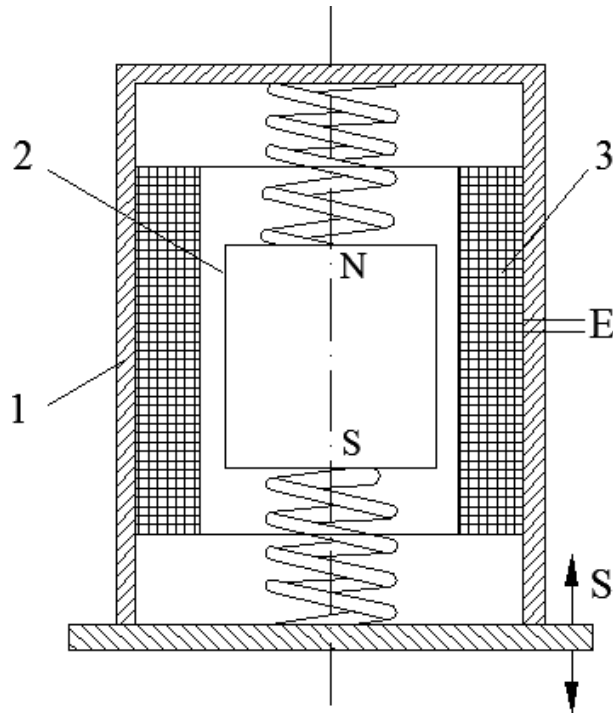


Рисунок 1.6 Конструкція давача вібрації з МП

МП є диференціюючим перетворювачем, і ЕРС на його виході залежить від швидкості взаємного переміщення корпусу давача з котушкою 3 щодо невібруючого постійного магніту 2, тому в цих давачах роблять ВВП з

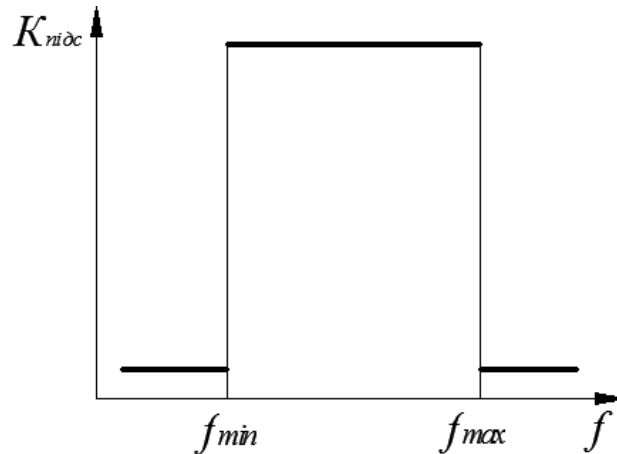
$\gamma > 1,5$, тобто такі, коли $x = S$. В цьому випадку ЕРС на виході МП можна знайти за формулою

$$\eta = - \frac{d\psi}{dt} = K \frac{d\psi}{dt} = K \dot{s},$$

де K — коефіцієнт пропорційності — чутливість давача, мВ

Отже, для отримання інформації про віброшвидкість в віброметрах з МП необхідно вимірювати ЕРС змінного струму. ЕРС на виході МП має мале значення, тому її необхідно посилити. Однак при передачі ЕРС від МП до входу підсилювача на дроти впливають електромагнітні та електростатичні поля, які викликають в дротах інші ЕРС, так звані наведення, які мають частоти відмінні від частоти вібрації. У той же час

вібрація двигуна може відбуватися з різними частотами. Тому, щоб посилювати ЕРС тільки необхідної частоти (першої роторної гармоніки), підсилювачі віброметрів швидкості з МПП повинні мати постійний коефіцієнт передачі (підсилення) $K_{ус}$ в усьому діапазоні частот ЕРС (від f_{min} до f_{max}). АЧХ такого підсилювача (залежність коефіцієнта



посилення від частоти підсилювального сигналу) повинна мати вигляд, близький до показаного на рис. 1.7.

Рисунок 1.7 Ідеальний вигляд АЧХ підсилювача віброметра швидкості

Для отримання бажаної АЧХ підсилювача віброметра швидкості,

струк-

турна схема якого показана на рис. 1.8, після вхідного каскаду посилення ВК, узгоджувального великий вихідний опір МПП з низьким вхідним опором наступних каскадів, включають послідовно інтегруючий і диференціюючий RC-ланцюжок, а потім два виборчих каскади посилення. Інтегруючий ІЛ і диференціюючий ДЛ ланцюжки забезпечують затухання на частотах відповідно $f > f_{max}$ і $f < f_{min}$.

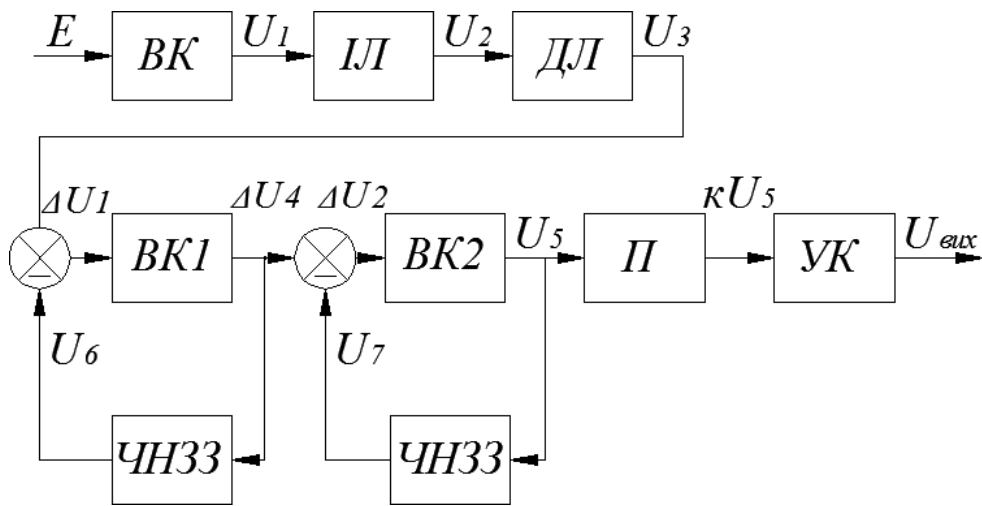


Рисунок 1.8 — Структурна схема підсилювача віброметра швидкості

Перший виборчий каскад $BK1$ за рахунок частотозалежного негативного зворотного зв'язку $ЧНЗЗ$ має АЧХ, показану на рис. 1.9 кривою 2. Він посилює ЕРС з частотами вище f_{min} . Другий виборчий каскад $BK2$, має АЧХ, показану кривою 1. Цей каскад підсилює ЕРС з частотами нижче f_{max} . В результаті такого включення RC-ланцюжків і виборчих підсилювачів отримують АЧХ підсилювача (крива 3), близьку до ідеальної (рис. 1.7).

Рисунок 1.9 — Дійсна АЧХ підсилювача віброметра швидкості

Для отримання необхідного значення коефіцієнта підсилювача після другого виборчого підсилювача підсилюють невиборчий каскад підсилення Π (рис. 1.8). Вихід цього каскаду з'єднують зі входом узгоджувального каскаду $УК$, що забезпечує узгодження високого вихідного опору підсилювача з низьким вхідним опором наступних пристроїв. Віброметри швидкості з МПП використовуються на всіх повітряних судах з турбореактивними або турбо- вентиляторними двигунами .

На повітряних судах з ТВД, у яких частота обертання вала гвинта постійна, виконується умова $a=V=s$, тобто віброприскорення прямопропорційне віброшвидкості, тому віброметри з МПП можуть бути використані для вимірювання віброприскорення.

Однак підсилювач віброметра прискорення для ТВД повинен посилювати ЕРС тільки однієї частоти і може мати коефіцієнт посилення,

відмінний від коефіцієнта посилення віброметра швидкості. З огляду на, що практично в ТВД частота обертання може трохи змінитися і що неможливо створити кілька ТВД з абсолютно однаковою частотою обертання валу гвинта, підсилювач віброметра прискорення з МПП повинен мати смугу пропускання частот, але дуже вузьку: 5-10 Гц.

Для отримання необхідної форми АЧХ підсилювача віброметра прискорення на вході підсилювача встановлюють подвійний Т-подібний RC-фільтр, включений в ланцюг негативного зворотного зв'язку підсилювального П і узгоджувального УК каскадів (рис. 1.10), який налаштований так, що на робочій частоті негативний зв'язок відсутній і коефіцієнт посилення максимальний.

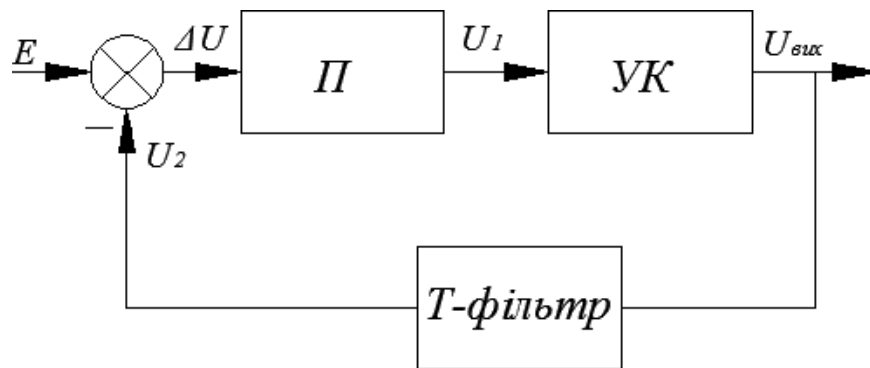
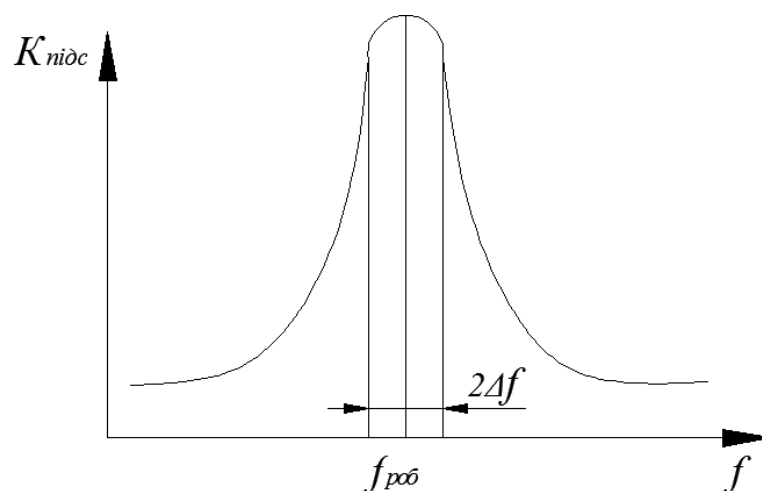


Рисунок 1.10 — Схема включення Т-фільтра

АЧХ підсилювача віброметра прискорення з МПП показана на рис. 1.11. Для отримання інформації про вібропереміщення інтегрують сигнал з виходу підсилювача віброметра швидкості.



1.4 П'єзоелектричні перетворювачі

У давачах вібрації з ПЕП (рис. 1.12) використовується п'єзоелектричний ефект, тобто властивість деяких кристалів утворювати електричні заряди на їх поверхні при механічних деформаціях.

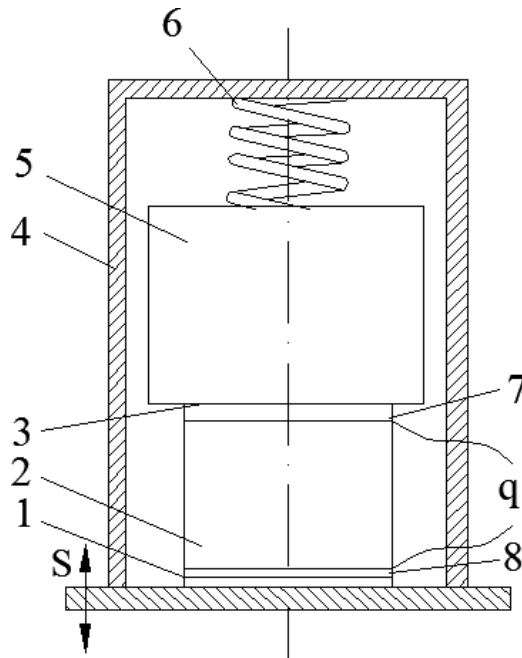


Рисунок 1.12 — Давач вібрації з ПЕП

У такому давачі ПЕП 2 через ізолятор 1 жорстко кріпиться до корпусу 4 давача, невібруючий елемент 5 також через ізолятор 3 з'єднується з ПЕП. При вібрації давача за рахунок інерції невібруючого елемента виникає сила

, що викликає деформацію ПЕП і на електродах 7, 8 утворюється електричний заряд, який визначається співвідношенням

$$q = d_{11}F,$$

Де d_{11} — постійний для даного кристала коефіцієнт, званий п'єзоелектричним модулем, Кл/Н; — F сила, що викликає деформацію, Н.

Сила F , що викликає деформацію п'єзоелектричного елемента, залежить від маси невібруючого елемента 5 (рис. 1.12) і впливаючого на п'єзоелемент прискорення. Отже, давач вібрації з ПЕП ВВП повинен мати

власну частоту значно вищу частоти вібрації .

В цьому випадку напруга на виході ПЕП

$$U = \frac{q}{c_n + c_l} = \frac{d_{11} m}{c_n + c_l} a,$$

де C_n, C_l — електрична ємність п'єзоелемента і лінії, що з'єднує його з наступними пристроями; m — маса невіброуючого елемента, кг.

Для зменшення впливу ємності сполучної лінії C_l в віброметрі з ПЕП необхідно застосовувати підсилювач заряду (ПЗ), який повинен розташовуватися поблизу давача або безпосередньо в ньому. ПЗ повинен мати нескінченно великий вхідний опір, мізерно малу вхідну ємність і низький вихідний опір. У технічних пристроях реалізувати ПЗ, що задовольняє зазначеним вимогам, практично неможливо, тому замість ПЗ в авіаційних віброметрах застосовували підсилювач напруги (ПН), який має великий вхідний опір (сотні мегаом) , малу вхідну ємність (одиниці-десятки пікофард) і відносно малий вихідний опір.

З виходу ПН напруга надходить на вхід підсилювача, що має АЧХ, аналогічну АЧХ підсилювача віброметра швидкості з МП. Структурна схема підсилювача віброметра з ПЕП відрізняється від структурної схеми підсилювача віброметра швидкості тільки тим, що перед вхідним каскадом (ВК) включається ПН. Для отримання інформації про віброшвидкість та вібропереміщення необхідно проінтегрувати сигнал з виходу підсилювача віброметра один або два рази відповідно.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВИ ЛАЗЕРНОЇ ВІБРОМЕТРІЇ

- Для контролю малорозмірних або тонкостінних об'єктів, важкодоступних або нагрітих до високих температур об'єктів, використовуються безконтактні, зазвичай — оптичні методи
- Будь-який оптичний метод вимірювання параметрів вібрації включає в себе операції:
 - - освітлення об'єкта;

- - перетворення параметрів вібрації об'єкта в параметри оптичного випромінювання, що характеризується зміною в часі за заданим законом амплі- туди, частоти, фази або поляризації електромагнітної хвилі (модуляція світла); детектування відбитого від об'єкта випромінювання по відповідному параметру;
 - математична обробка сигналу детектора і уявлення параметрів вібра- ції в заданих одиницях виміру.

В якості світлочутливого елемента фотодетектора в даний час найбільш широко використовуються так звані фотоелектричні приймачі оптичного ви- промінювання: фоторезистори, фотодіоди, фотопомножувачі і більш складні прилади, зроблені на їх основі (фотопотенціометр, диссектор, матриця фото- діодів).

Перераховані елементи чутливі тільки до інтенсивності випромінюван- ня, тому для отримання інформації, що містяться в частоті, фазі або поляри- зації відбитого від об'єкта (або того, що пройшов через нього) оптичного си- гналу, до складу фотодетекторів входять різні інтерференційні або поляриза- ційні оптичні дискримінатори, лінзи і діафрагми.

Як джерела світла найбільш зручні лазери, випромінювання яких крім інтенсивності характеризується ще і високою когерентністю і гострою спря- мованістю

Для математичної обробки сигналу фотодетектора, зручного та операти- вного представлення результатів, як правило, використовуються комп'ютери з відповідним апаратним та програмним забезпеченням.

З усіх джерел випромінювання оптичного діапазону лазерні джерела

характеризуються найбільшим ступенем когерентності і монохроматичності генеруючого ними випромінювання. Крім того, лазери мають наступні позитивні властивості: високу стабільність і відтворюваність частоти випромінювання, малий кут розходження, малу чутливість до зміни температури навко-

лишнього середовища, що особливо важливо при метрологічних дослідженнях. Тому при розробці приладів, призначених для високоточного вимірювання параметрів руху в машинобудуванні, лазерні джерела знайшли широке застосування. Методи перетворення параметрів вібрації в електричний сигнал можна класифікувати за способом виділення інформації про параметри руху (фотоелектричні, інтерференційні, доплерівські) і за способом прийому інформації про параметри руху (одночастотні, двочастотні і т.д.).

Основні методи лазерної віброметрії, які отримали реальне втілення в приладах, наведені на рис. 2.1. Фотоелектричні методи перетворення засновані на вимірі зміни інтенсивності лазерного випромінювання, інтерференційні — на використанні явища інтерференції в оптичному діапазоні, доплерівські — на зміні частоти випромінювання лазера, відбитого від об'єкта вібраційного контролю

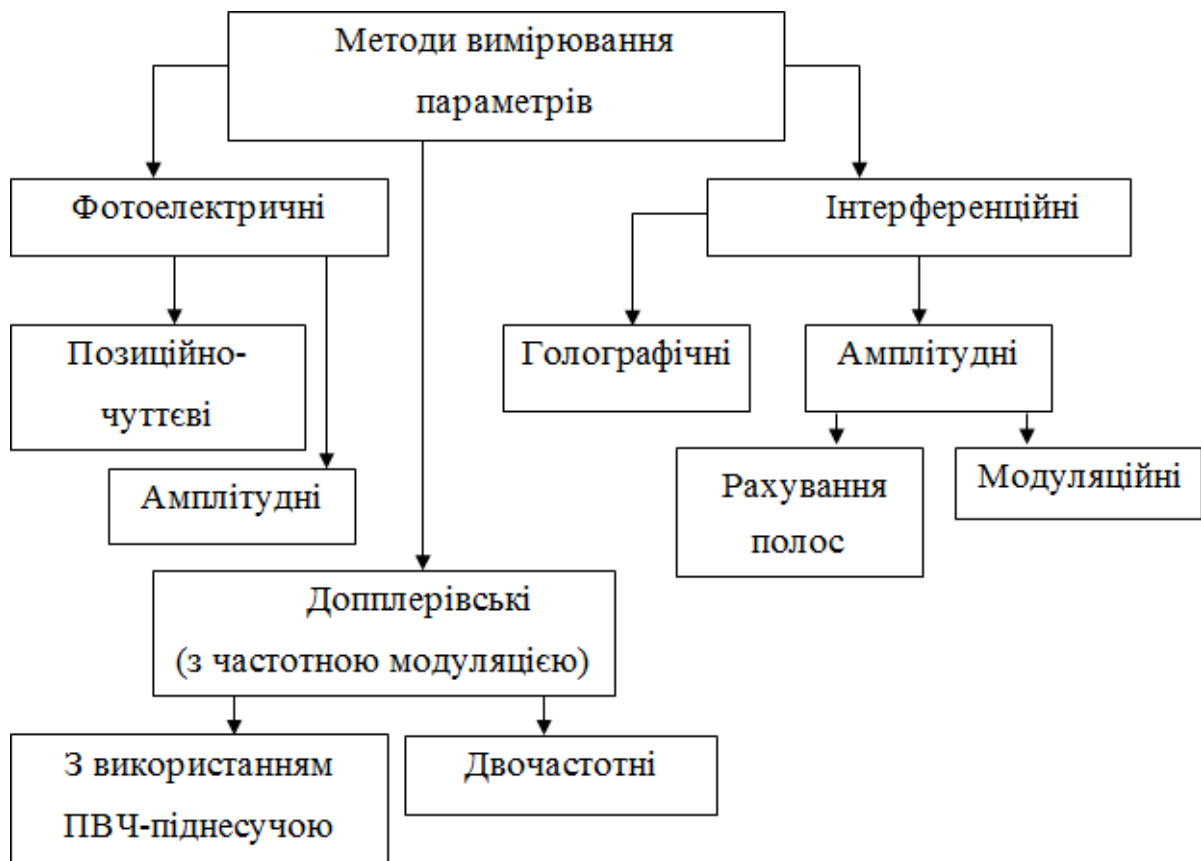


Рисунок 2.1 — Класифікація методів лазерної віброметрії

Перш ніж детально розглядати доплерівський метод вимірювання вібрації, дамо визначення деяких основних понять і величин лазерної віброметрії. Як в інтерференційних, так і в доплерівських методах набув поширення двопроменевий інтерферометр Майкельсона. Розглянемо схему інтерферометра (Рис. 2.2) більш детально. Випромінювання лазера 1 надходить на світлоподілювальний кубик 2 і розділяється на дві частини. Отримані промені спрямовуються відповідно на нерухомий відбивач 3 і на переміщуваний разом з вимірюваним об'єктом відбивач 4. Відображені від рухомого 4 і нерухомого 3 дзеркал оптичні промені поєднуються на розділовій поверхні кубика 2 та інтерферують. В окулярі 5 спостерігається інтерференційна картина.

Якщо різниця ходу променів інтерферометра $\delta_0 = 0; \pm\lambda/2; \pm2\lambda/2; \dots; \pm n\lambda/2$, то інтерференційне поле має максимум освітленості. При різниці ходу $\delta_0 = \pm\lambda/4; \pm3\lambda/4; \dots; \pm(2n+1)\lambda/4$ промені сходяться в протифазі і інтерференційне поле має мінімум освітленості. Таким чином, можна виміряти величину переміщення дзеркала 4 по числу переходів зміни освітленості, що пройшли через діафрагму 6. Один період відповідає половині довжини хвилі лазерного випромінювання

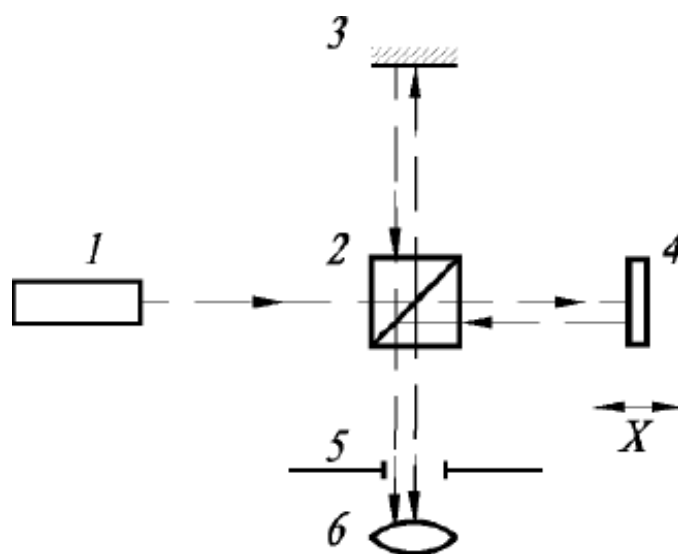


Рисунок 2.2 — Схема інтерферометра Майкельсона: 1 — лазер; 2 — світло розділювальний кубик; 3 — нерухоме дзеркало; 4 — рухоме дзеркало; 5 — окуляр; 6 — діафрагма

Ефект Доплера полягає в зміні частоти електромагнітного випромінювання при відносному русі приймача і джерела випромінювання. Якщо приймач і джерело випромінювання знаходяться в одній системі координат, а випромінювання відбивається від іншої, то при відносному русі цих двох інерційних систем координат має місце дворазовий ефект Доплера. В цьому випадку доплерівська зміна частоти відбитого випромінювання визначається

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

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

Під частотою коливання розуміють частоту вихідного сигналу фотоприймача в лазерній вимірювальній системі при відсутності частотної модуляції (наприклад, доплерівського зсуву частоти). Несуча частота, як правило, визначається різницею між частотою випромінювання ω лазера 1 (рис. 2.3) і частотою $\omega + \Omega$ випромінювання лазера, зміщеного на величину Ω за допомогою будь-яких пристроїв зсуву частоти 6 (електрооптичних, ультразвукових і т.д.)

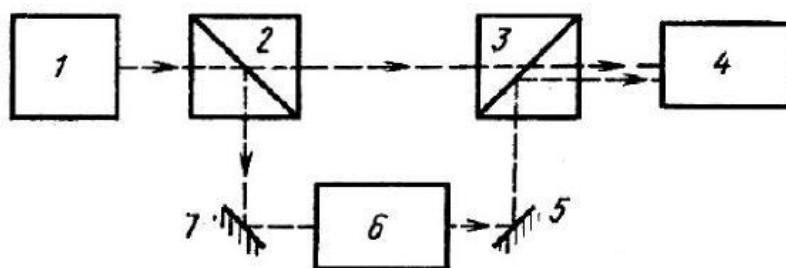


Рисунок 2.3 — Схема інтерферометру зі зміщенням частоти: 1 — лазер; 2, 3 — світлоподільний кубик; 4 — фотоприймач; 5, 7 — дзеркало;

6 — пристрій зсуву частоти

Поєднання в просторі випромінювань з частотами ω і $\omega + \Omega$ здійснюють за допомогою світлоподільних елементів 2, 3 і відображаючих дзеркал 5, 7. Вихідний сигнал фотоприймача 4 має вигляд: $u(t) = U \sin \Omega t$,

де $\Omega = (\omega + \Omega) - \omega$ — частота носій

При вібрації об'єкта 4 (рис. 2.4), гармонійної, доплерівської зміни частоти випромінювання, відбитого від об'єкта вібраційного контролю, визначається виразом:

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

Де ω — кругова частота випромінювання лазера; ω_0 — кутова частота коливань об'єкта вібраційного контролю; V_0 — амплітуда швидкості вібрації об'єкта вимірювання.

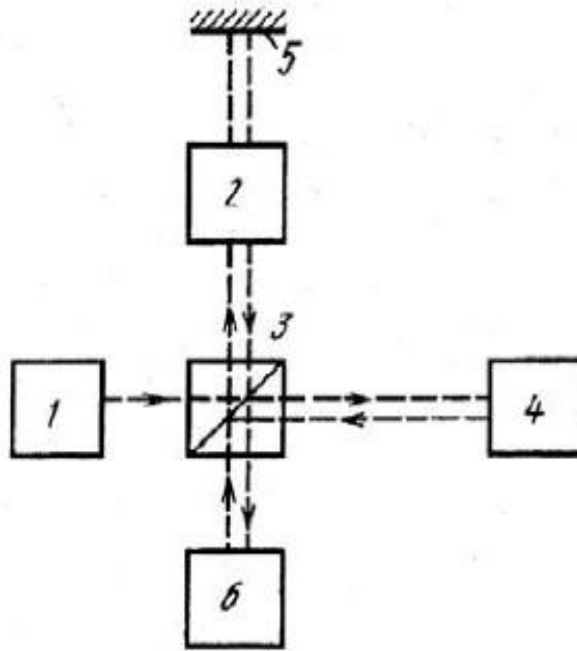


Рисунок 2.4 — Схема інтерферометра Майкельсона зі здвигом частоти: 1 — лазер; 2 — пристрій здвигу частоти випромінювання лазера;

3 — світлоподільвальний елемент; 4 — об'єкт вібраційного контролю; 5 — нерухоме дзеркало; 6 — фотоприймач

Лазерний доплерівський віброметр.

Лазерні доплерівські давачі вібрацій найбільш повно реалізують ідею безконтактних вимірювань. Доплерівське зміщення частоти випромінювання, розсіяного на рухомих частинках або поверхнях, відноситься до числа давно відомих і добре вивчених явищ. Однак до впровадження лазерних джерел випромінювання через спектрометричні труднощі можна було вимірювати лише порівняно великі швидкості.

Лазерне випромінювання, володіючи високою монохроматичністю, має і незрівнянно кращі характеристики щодо розходження і інтенсивності пучка, в порівнянні з випромінюванням від інших джерел. Все це дозволяє вимірювати менші поперечні перерізи розсіяння з великим кутовим дозволом. Крім того, висока монохроматичність лазерного випромінювання дозволяє використовувати такі методи обробки світлового сигналу, як гетеродинне детектування і вузькополосну фільтрацію.

Допплерівські давачі мають такі переваги:

- визначають можливість отримання високого співвідношення сигнал/шум;
- забезпечують частотне і просторове придушення фону зовнішнього засвічення без застосування оптичних фільтрів;
- дозволяють вимірювати параметри механічних коливань складної форми на значних відстанях від об'єкта вимірювання;
- мають високу перешкодозахищеність;
- допускають здійснення аналізу вихідного сигналу фотоприймача в частотному діапазоні, що перевищує область низькочастотних шумів фотоприймача і лазера.

Основні проблеми застосування доплерівських давачів, полягають в наявності вимог до світлопровідного середовища між лазером і поверхнею вимірюваного об'єкта, а також до відбивної здатності поверхні об'єкта. Основними стримуючими факторами на шляху широкого застосування доплерівських давачів є досить глибокі фізико-математичні основи методу, а також складність і висока ціна приладового забезпечення.

РОЗДІЛ 3

СХЕМА ЛАЗЕРНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ

В даний час для створення зразкових і робочих засобів в області виміру параметрів механічних коливань використовують лазерні вимірювальні системи з частотною модуляцією.

Принцип дії лазерних систем для виміру параметрів механічних коливань заснований на використанні ефекту Доплера, що полягає в зміні частоти світлового випромінювання при відносному русі приймача і джерела випромінювання.

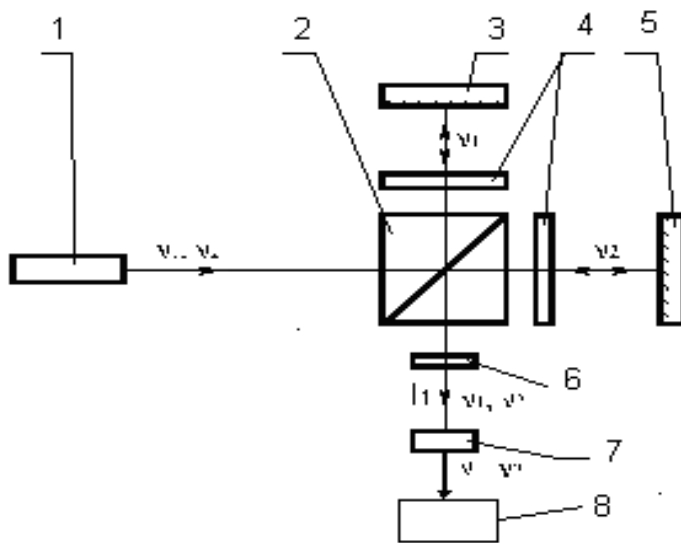
Доплерівська зміна частоти відбитого від об'єкта виміру світлового випромінювання $\omega_d = 2\omega V_r/c$, де ω – кругова частота світлового випромінювання; V_r - швидкість руху об'єкта; c - швидкість світла.

З одночастотних лазерних вимірювальних систем з частотною модуляцією найбільше поширення одержав двопроменевий інтерферометр чи, як його ще називають, інтерферометр Майкельсона.

У цьому інтерферометрі на приймач направляються дві електромагнітні хвилі:

- розсіяна, котра містить доплерівський зсув частоти;
- опорна від джерела когерентного випромінювання (частина випромінювання лазера).

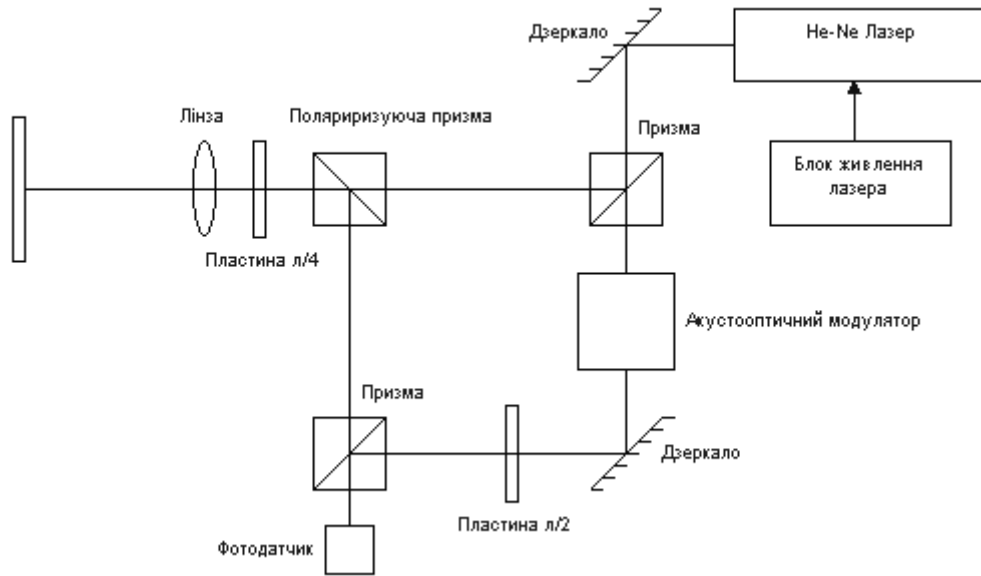
На мал. 3.1 приведена схема ЛВС. Двохчастотний лазер 1 випромінює дві хвилі з частотами ν_1 і ν_2 , одна з яких поляризована паралельно, а інша - перпендикулярно площини креслення. Поляризаційна призма-куб 2 розділяє складові випромінювання різних частот і направляє їх у різні плечі інтерферометра.



Мал. 3.1.

Пластина $\lambda/4$ - позиція 4 змінюють стан поляризації пучків на ортогональне. Поляризаційна призма-куб 2 забезпечує суперпозицію пучків, повернутих відбивачами 3 і 5, у напрямку I_1 . Після поляризаторів 6 у результаті інтерференції пучків з різними частотами утворяться опорний вимірювальний I_1 сигнали биття.

Оскільки номенклатура двохчастотних лазерів і значення різниці частот, що вони забезпечують, обмежені, як джерело випромінювання часто використовують одночастотний лазер, зрушуючи частоти ортогональних складових його випромінювання акустооптичними модуляторами (мал. 3.2), що встановлюють на вході, виході чи в одному з плечей інтерферометра. У цьому випадку опорний сигнал може бути отриманий безпосередньо із сигналів, подаваних на акустооптичні модулятори.



Мал. 3.2.

Частота частотної модуляції обмежує час виміру. Однак при використанні акустооптичних модуляторів вона може бути досить великою, щоб цим обмеженням можна було зневажити. Тоді час однократного виміру фази визначається часом затримки фазовимірювального пристрою і складає для сучасних ЛВС близько 10 мкс .

Тому що ЛВС на основі частотної модуляції забезпечують час виміру на порядок менше, ніж ЛВС на основі фазової модуляції, припустимі швидкості зміни ГРХ у них на порядок вище. Ці ЛВС вважаються в більшому ступені придатними для високоточних вимірів у реальному масштабі часу. При рівній погрішності вони мають трохи більший діапазон виміру ГРХ.

Частотну модуляцію інтерференційного сигналу забезпечують шляхом суперпозиції двох хвиль різної оптичної частоти. У цьому випадку закон зміни інтенсивності має вид

$$I(t) = I_1 + I_2 + I_1 * \cos(4\pi * \nu_1 * t + \phi_1) + I_2 * \cos(4\pi * \nu_2 * t + \phi_2) + 0.5 * \sqrt{I_1 * I_2} * \cos(2\pi(\nu_1 + \nu_2) * t + (\phi_1 + \phi_2)) + 0.5 * \sqrt{I_1 * I_2} * \cos(2\pi(\nu_1 - \nu_2) * t + (\phi_1 - \phi_2))$$

де I_1 і I_2 - інтенсивності, ν_1 і ν_2 - оптичні частоти, ϕ_1 і ϕ_2 - фази інтерферуючих хвиль.

Усі перемінні складові сигналу, крім останньої, унаслідок високої частоти не можуть бути детектовані фотоприймачем безпосередньо.

Вибираючи близькі оптичні частоти інтерферуючих хвиль, зручну для обробки у фотоелектронній системі. Цю частоту називають сигналом биття.

Особливість сигналу биття в тім, що навіть під час відсутності зміни ГРХ між інтерферуючими хвилями інтенсивність змінюється по гармонійному закону. Якщо одна з інтерферуючих хвиль проходить додатковий геометричний шлях $2L$, то сигнал биття одержує додаткове фазове зрушення $\varphi=4\pi L/\lambda$, еквівалентне фазі немодульованого інтерференційного сигналу на довжині хвилі λ при ГРХ інтерферуючих променів, рівної $2L$.

Щоб визначити ГРХ, вимірюють фазове зрушення

$$\varphi(t)=2\pi t * \varphi_b$$

між опорним і вимірювальним сигналами биття:

$$I_0(t)=A_0 * \text{COS}[2\pi(\nu_1-\nu_2)t+(\varphi_1-\varphi_2)] ,$$

$$I_1(t)=A_1 * \text{COS}[2\pi(\nu_1-\nu_2)t+(\varphi_1-\varphi_2)+\varphi(t)] ,$$

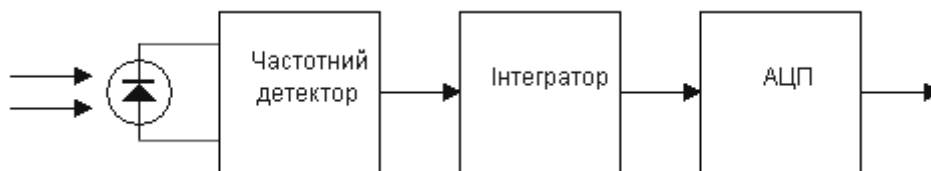
де A_0 и A_1 - їхні амплітуди.

У ЛВС на основі частотної модуляції має місце принципове обмеження швидкості зміни вимірюваних відстаней. У сучасних ЛВС вона не перевищує 1 м/с.

Двохчастотні лазерні вимірювальні системи з частотною модуляцією відрізняються від одночастотних тим, що когерентне випромінювання в опорному плечі яким-небудь чином(наприклад, електрооптичним перетворювачем) зрушується по частоті щодо випромінювання у вимірювальному плечі. Наявність несучої частоти у вихідному сигналі фотоприймача, рівної різниці частот опорного і вимірювального оптичних сигналів, дозволяє здійснювати аналіз вихідного сигналу в частотному діапазоні вище області низькочастотних шумів фотоприймача і лазера і забезпечує одержання на виході лазерної системи електричного сигналу, пропорційного механічному коливанню об'єкта виміру з високими швидкостями, частотою і довільним законом зміни за часом.

Для аналізу параметрів вібрації можна використати персональний комп'ютер, але сигнал з фото датчика потрібно попередньо перетворити в сигнали, які безпосередньо будуть оброблятися в ПК.

На малюнку 3.3. зображена блок-схема такого перетворювача. Сигнал з фото датчика потрапляє до частотного детектора, який перетворює зміну частоти в електричний сигнал, пропорційний зміні віброшвидкості. На виході інтегратора електричний сигнал вже пропорційний дійсному коливанню об'єкта. Цей сигнал потрапляє до перетворювача напруги в цифровий сигнал, який і потрапляє на вхід персонального комп'ютера.



Мал. 3.3.

3.1.Лазер

Лазери - це джерела когерентного оптичного випромінювання (оптичне випромінювання когерентне, якщо його амплітуда, частота, фаза, напрямок поширення і поляризація постійні або змінюються, але не хаотично, а упорядковано, за визначеним законом), принцип дії яких заснований на використанні явища індуктованого випромінювання.

Слово «лазер» являє собою аббревіатуру англійської фрази «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», що перекладається як посилення світла в результаті змушеного випромінювання. Пристрій, що генерує електромагнітні коливання на основі використання явища індуктованого випромінювання у СВЧ діапазоні, було створено в 1953—1954 р. Н. Г. Басовим і А. М. Прохоровим у СРСР і групою Ч. Таунса в США.

3.1.1. Принцип дії лазера

Енергія атома і молекули квантується, тобто енергія не змінюється безупинно, а приймає лише деякі визначені значення. Цим значенням енергії відповідають енергетичні рівні. Перехід атома або молекули з одного енергетичного рівня на інший відбувається стрибком. При цьому поглинається або, навпаки, випускається відповідна порція випромінювання — квант світла, або, інакше, фотон. При переході атома на більш високий енергетичний рівень фотон поглинається; при переході ж атома на, більш низький рівень відбувається випромінювання фотона. Енергія фотона, що поглинається або випускається, дорівнює різниці енергій рівнів атома, між якими відбувається перехід. Енергія фотона є $h\nu$, де ν — частота випромінювання, h — постійна Планка ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Дж с).

При взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною збільшення енергії поля відбувається внаслідок спонтанного й індукованого випромінювань, а зменшення — внаслідок поглинання електромагнітного випромінювання. Усі три явища носять випадковий характер і описуються статистичними закономірностями. Імовірності індукованого випромінювання і поглинання пропорційні щільності енергії електромагнітного випромінювання, що взаємодіє з речовиною. Індуковане випромінювання виникає під впливом електромагнітного поля при переході частки (атома або молекули) з верхнього енергетичного рівня на нижній. Індуковане випромінювання збігається по частоті, напрямку поширення, поляризації і фазі з випромінюванням, що викликало його. Саме ця властивість індукованого випромінювання і дозволяє одержати когерентне випромінювання за допомогою лазера. При поглинанні електромагнітної енергії частка (атом або молекула) переходить на енергетичний рівень з великим значенням енергії. Такий стан частки називають збудженим. Спонтанне випромінювання виникає мимоволі при переході частки з верхнього рівня на нижній. Воно не залежить від зовнішніх впливів, а визначається тільки властивостями часток.

Для одержання посилення електромагнітного поля, взаємодіючого з ансамблем часток (під ансамблем часток розуміється сукупність атомів, молекул, іонів, укладених у заданий обсяг і енергетичні рівні, що володіють однаковою структурою), необхідно, щоб число часток на верхньому енергетичному рівні було більше, ніж на нижньому. Такий стан ансамблю часток називають інверсним або станом з інверсною населеністю.

«Серце» лазера — це його активний елемент. Вкрапленнями є атоми або молекули, що мають дуже важливу у даному випадку властивість. Виявившись на одному зі своїх верхніх енергетичних рівнів, вони можуть відносно довго залишатися на ньому, не кваплячись мимоволі (спонтанно) повернутися на нижні рівні. Тому можна «нагромадити» досить багато атомів (молекул) на такому рівні — так, що них стане більше, ніж на нижніх рівнях. У результаті буде створена інверсна населеність рівнів, що необхідно для переваги процесів змушеного випускнення світла над процесами поглинання світла. Рівень, на якому можна нагромадити надлишок атомів або молекул, називають довгоживучим, а самі атоми і молекули — активними центрами.

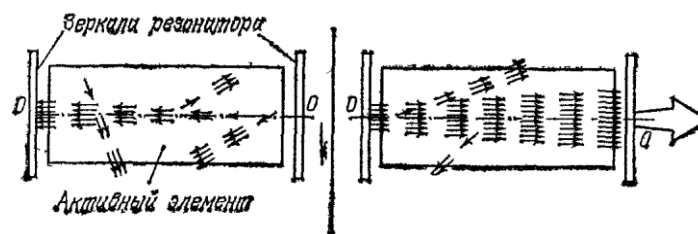
Поглинаючи випромінювання спеціальної лампи-освітлювача, активні центри збуджуються: переходять на верхні рівні (рівень 3). Потім вони швидко «звалюються» з цих рівнів і накопичуються на довгоживучому рівні (рівні 2), витрачаючи надлишок енергії на нагрівання активного елемента. Активний елемент буде готовий до роботи тоді, коли на ньому нагромадиться значно більше іонів неодиму, чим їх є на рівні 1. Тепер досить «сигналу», роль якого зіграє фотон, з енергією, рівною різниці енергій рівнів 2 і 1, щоб відбувся перехід активних центрів з рівня 2 на рівень 1. У результаті цього переходу виникне лавина фотонів, що і буде являти собою лазерне випромінювання.

Через те, що спонтанно народжувані фотони випускаються активними центрами неузгоджено в часі і притому у самих різних напрямках, для одержання лазерного випромінювання ансамбль часток повинний знаходитися в резонаторі, який у найпростішому випадку являє собою два дзеркала з коефіцієнтами відображення r_1 і r_2 .

Схематично це показано на мал. 3.4 Напрямок лазерної генерації позначено на малюнку як 00_1 . Спонтанні фотони, що випадково народилися в напрямку 00_1 , будуть проходити всередині активного елемента відносно довгий шлях, що, до того ж, багаторазово збільшується унаслідок відображення випромінювання від дзеркал резонатора.

Взаємодіючи зі збудженими активними центрами, ці фотони ініціюють, у кінцевому рахунку, могутню лавину вимушено випущених фотонів, що і утворить лазерний промінь. Що ж стосується тих спонтанних фотонів, що народилися в інших напрямках, то вони (так само як і відповідні їм лавини вторинних фотонів) пройдуть усередині активного елемента порівняно короткий шлях і дуже швидко «вийдуть з гри».

Таким чином, дзеркала оптичного резонатора виділяють у просторі визначений напрямок, уздовж якого реалізуються найбільш сприятливі умови для розвитку фотонних лавин. Це і є напрямок лазерного променя, що виходить з резонатора через одне з його дзеркал (так зване вихідне дзеркало; воно є частково

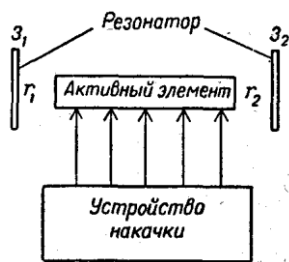


прозорим для лазерного випромінювання).

Мал. 3.4. Розвиток фотонної лавини уздовж осі резонатора 00

Якщо в ансамблі часток, поміщеному в резонатор, створити інверсну населеність, то в резонаторі виникнуть коливання на частоті, що відповідає частоті переходу часток зі збудженого стану в основне. Незатухаючі коливання будуть у тому випадку, якщо щільність інверсної населеності така, що втрати на випромінювання і нерезонансні втрати компенсовані індукованим випромінюванням.

Отже, для одержання лазерного випромінювання необхідно мати ансамбль часток, у якому може бути створена інверсна населеність, резонатор і пристрій, що забезпечує одержання інверсного стану. Ансамбль часток, у якому може бути створена інверсна населеність, називають активною речовиною або активним елементом лазера. Сукупність же елементів, що забезпечують одержання інверсної населеності, називають пристроєм або системою накачування. Структурна схема лазера зображена на мал. 3.5

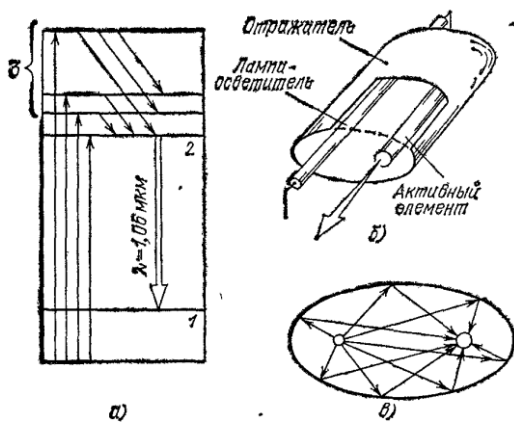


Мал. 3.5. Структурна схема лазера

2.1.2. Активна речовина лазера

Активна речовина твердотільних лазерів складається з двох основних компонентів: матриці й активатора. Введення в кристалічну основу іонів активатора приводить до появи в активованому кристалі областей селективного поглинання і спонтанної люмінесценції (центрів фарбування).

Властивості активної речовини визначаються не тільки активатором, але і матрицею. Матриця повинна бути прозорою, тобто не мати ні власного, ні примішаного поглинання на частоті генерації, мати високу оптичну і механічну однорідність, теплопровідність, твердість, термічну і хімічну стійкість. Як матриці активних речовин широко використовуються прості оксидні кристали з упорядкованою структурою, наприклад, рубін Al_2O_3 .



Мал. 3.6, а) Схема рівнів іона неодиму і квантові переходи, б) Лазер на гранаті з неодимом, в) Фокусування світлових променів на активний елемент за допомогою відбивача.

В активному елементі — гранаті з неодимом гранат являє собою прозорий кристал, активними центрами є іони неодиму, що вводяться в кристал граната в процесі виготовлення активного елемента. На мал. 3.6,а показана в спрощеному вигляді система енергетичних рівнів іона неодиму в гранаті.

На мал. 3.6,б схематично показано, як здійснюють збудження активних центрів у лазері. Активний елемент і лампа-освітлювач мають циліндричну форму. Їх поміщають усередину відбивача таким чином, щоб практично уся світлова енергія, що випускається лампою-освітлювачем, концентрувалася на активному елементі (мал. 3.6,в).

Напівпровідникові активні речовини відрізняються тим, що в них використовуються оптичні переходи між станами в електронних енергетичних зонах, тобто в оптичних переходах беруть участь вільні носії струму (електрони і дірки). Під впливом накачування електрон переходить з валентної зони в зону провідності, і утвориться пара електрон — дірка. Як і будь-яка система, електрон і дірка прагнуть зайняти положення, що відповідає мінімальній енергії, тому електрон прагне зайняти дозволене положення біля дна зони провідності, а дірка — біля стелі валентної зони.

У рідинних лазерах як активну речовину використовують:

- розчини неорганічних з'єднань рідкоземельних елементів (європія, тербія або неодиму);

•барвники — складні органічні сполуки, що володіють інтенсивними смугами поглинання у видимій і ультрафіолетовій областях спектра.

У рідинних лазерах з рідкоземельними елементами лазерне випромінювання виникає на переходах з метастабільних рівнів іонів цих елементів, порушення активного іона в металоорганічній рідині відбувається в результаті внутрімолекулярної передачі енергії від органічної частини комплексу до іона. У лазерах на органічних барвниках активною речовиною в них виступає барвник, а матрицею — розчинник. У рідких лазерних середовищах може бути досягнута велика концентрація активних часток, що дозволяє одержувати, так само як і в лазерах на твердому тілі, великі енергії і потужності випромінювання з одиниці об'єму активної речовини. У рідинах відсутні постійні напруги, структурні неоднорідності і включення, унаслідок чого їхні оптичні характеристики за обсягом ізотропні і постійні, а це сприяє одержанню випромінювання з високим ступенем просторової когерентності і спрямованості. У рідинних лазерах не виникають незворотні руйнування активної речовини при великих щільностях енергії.

До недоліків рідких лазерних матеріалів варто віднести високі значення температурних змін коефіцієнта переломлення, що приводить до появи значних оптичних неоднорідностей і до погіршення генераційних характеристик.

Газові активні середовища лазерів істотно відрізняються від описаних вище тим, що дозволяють генерувати випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль (від вакуумної ультрафіолетової області до інфрачервоного, практично субміліметрового, діапазону) в імпульсному і безперервному режимах. Газове активне середовище обумовлює ряд специфічних особливостей газових лазерів.

Їм властива висока монохроматичність і спрямованість випромінювання, оскільки гази мають істотно меншу щільність і велику однорідність.

Крім того, газові середовища збуджуються внаслідок різноманітних процесів-зіткнень в електричному розряді, хімічних реакцій, оптичного накачування.

У газових лазерах як активну речовину використовують:

- нейтральні атоми газів (H, He, Ne і ін.), металів (пари міді, золота, тулія, ітербія та ін.);

- іонізовані атоми аргону (Ar), ксенону (Xe), азоту (N), свинцю (Pb) і ін.;

- чадний газ, CO₂ (вуглекислий газ), H₂O(вода) і молекули інших газів.

В активних речовинах на нейтральних і іонізованих атомах для одержання лазерного випромінювання використовуються переходи між електронними рівнями, а в молекулярних лазерах — між електронними, електронно-коливальними, коливальними, коливально-обертальними і чисто обертальними рівнями.

Типовим представником лазера на нейтральних атомах (атомарного) є гелій-неоновий. Його достоїнствами є когерентність випромінювання, мала споживана потужність (8...10 Вт) і невеликі розміри. Основні недоліки — невисокий к. к. д. (0,01...0,1 %) і низька вихідна потужність, що не перевищує 60 мВт. Цей лазер може працювати й в імпульсному режимі, якщо для порушення використовувати імпульсну напругу великої амплітуди при тривалості в одиниці мікросекунд. Головні області практичного застосування гелій-неонових лазерів — наукові дослідження і вимірювальна техніка.

3.1.3.Резонатори

У лазерній техніці як резонатори використовуються відбивачі (дзеркала), між якими розташовується активна речовина. У найпростішому випадку відкритий резонатор складається з двох плоскопаралельних дзеркал. Використовувати його для одержання генерації в субміліметровому і інфрачервоному діапазонах хвиль запропонував А. М. Прохоров. Основна особливість оптичного діапазону хвиль полягає в тому, що довжина хвилі електромагнітного випромінювання цього діапазону дуже мала, так що практично завжди розміри резонаторів виявляються істотно більше довжини хвилі.

У відкритому резонаторі втрати малі тільки для тих хвиль, напрямок поширення яких перпендикулярний площинам дзеркал або відхилений від нього

на невеликий кут. Всі інші типи коливань мають дуже великі втрати і швидко загасають.

Спектр випромінювання лазера визначається в основному шириною лінії люмінесценції активної речовини і власних частот резонатора. Лазер випромінює тільки на тих частотах, що є власними частотами резонатора, збігаються з лінією люмінесценції і коефіцієнт підсилення для яких достатній для компенсації усіх втрат у резонаторі.

Лінією люмінесценції називають розподіл інтенсивності випромінювання по частотах. Лінія люмінесценції характеризується формою, а найбільш простою характеристикою форми лінії є її ширина $2\Delta f$, тобто різниця між частотами, інтенсивність поглинання (випромінювання) на яких в задане число раз менше інтенсивності, яка відповідає максимуму поглинання (випромінювання). Ширина і форма лінії залежать як від зовнішніх умов, у яких знаходиться дана атомна система, так і від внутрішніх, тобто від природи атомної системи.

В тих авіаційних системах, у яких не потрібна висока монохроматичність випромінювання, використовуються лазери, що працюють у багатомодовому режимі, тому що при цьому реалізуються максимальні ККД.

У газових активних середовищах ширина лінії люмінесценції істотно менше. У газових лазерах істотно простіше досягти одномодового і навіть одномодового й одночастотного режимів, ніж у лазерах на конденсованих середовищах. Одномодовий і одночастотний режим характеризується дуже вузьким спектром.

3.2. Оптичні датчики

Безконтактний вимір ряду фізичних величин, як, наприклад, переміщень, вібрацій, температури і т.д., виявляється можливим лише за допомогою оптичних датчиків. При цьому інформація передається не по кабелі, а світловими хвилями, що можуть змінюватися по інтенсивності, фазі, чи кольору геометричному розподілу в просторі і завдяки цьому виявляються придатними для одержання і передачі інформації. Надзвичайно простим оптичним датчиком є, наприклад, відомий фотоячейка.

Фотоячейка складається з джерела світла (лампи накаливання чи світлодіода) і приймача (фотодіода чи фоторезистора). Порушення передачі світла від джерела до приймача служить інформацією про перебування об'єкта у фотоячейці. Якщо число імпульсів віднести до одиниці часу, то, наприклад, при конвеєрному виробництві можна одержати інформацію про кількість деталей, виготовлених за 1 година чи за день.

Основні принципи перетворення оптичного сигналу в електричний здійснюється детекторами випромінювання, що використовують різні фізичні ефекти.

3.2.1. Фотодіоди

При опроміненні кремнієвих фотодіодів світлом у них виникає напруга, певним чином залежна від сили світла. Ефект, що викликає виникнення цієї напруги, називається внутрішнім фотоефектом.

На практиці найчастіше застосовують рпн-діоди. Ці діоди мають шарувату структуру (мал. 3.7), у якій тонкі провідні шари р- і n-типу розділені областю нелегованого високоомного кремнію (і). При влученні на рпн-перехід світлових променів досить високої енергії ($E = h\nu$) виникає фотострум I_{sh} (струм короткого замикання) порядку 0.1..1 А/ Вт. Чутливість такого фотодіода дуже сильно залежить від довжини хвилі (кольору) використовуваного випромінювання. На мал. 2.8,а представлена спектральна чутливість типової кремнієвої фотоячейки в діапазоні довжин хвиль від 200 нм до 1,2 мкм (1200 нм).

Позначена тут через $Q \cdot E$ квантова ефективність характеризує відношення числа фотонів, що потрапили на діод, до числа електронів, що виникли у виді фотоструму I_{sh}

Фототок I_{sh} змінюється лінійно в залежності від інтенсивності падаючого світла при її зміні в межах більш 6 порядків, так що можливо пряму індикацію інтенсивності світла.

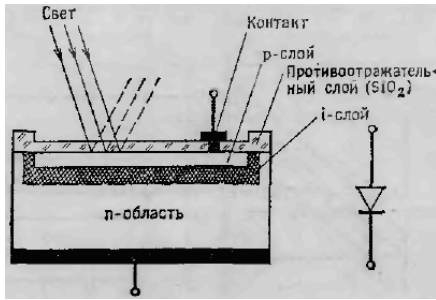


Рис. 3.7. Структура рiн-дiода.

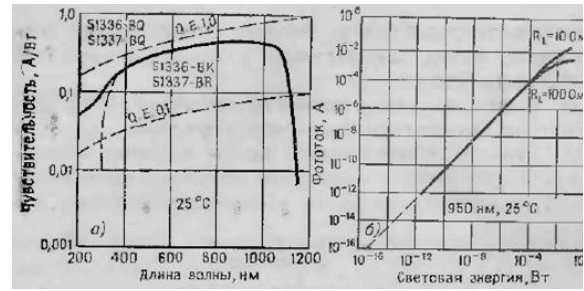


Рис. 3.8. Характеристики рiн-дiода.

Нижня область цiєї характеристики обмежена шумами (шуми Джонсона, шуми темного току i шуми дробового ефекту).

Для визначення здатностi датчика основне значення має еквiвалентна потужнiсть шуму (ЕПШ). Цей параметр визначається як вiдношення шумового струму (в $A/\Gamma\text{ц}^{1/2}$) до чутливостi до свiтлового потоку (в $A/Вт$) при вiдношеннi сигнал/шум, рiвному 1. Оскiльки чутливiсть до променевого потоку залежить вiд довжини хвилi, те це ж справедливо i для параметра ЕПШ. Виготовлювачi детекторiв випромiнювання найчастiше вказують значення ЕПШ у максимумi кривої чутливостi, причому майже завжди в звичайних детекторiв випромiнювання воно складає приблизно $10^{-15} \text{ Вт}/\Gamma\text{ц}^{1/2}$.

Перетворення слабких фотострумiв порядку $10^{-8} \dots 10^{-2} \text{ А}$ вимагає ретельного вибору схем пiдсилювачiв. Типовi схеми для перетворення струм - напруга показанi на мал. 3.9, а i б.

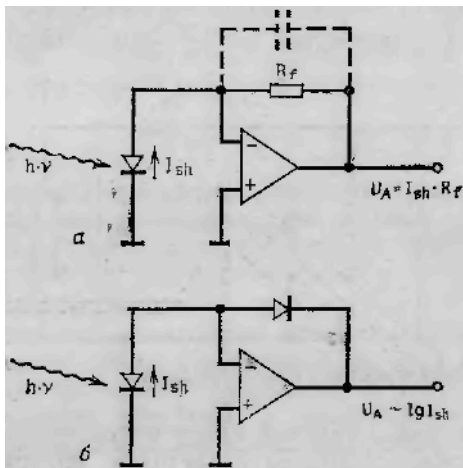


Рис. 3.9. Лінійне (а) і логарифмічне (б) посилення по струму.

Перетворення струм - напруга з забезпеченням лінійності вихідної напруги здійснюється за допомогою резистора R_f у ланцюзі зворотної зв'язку операційного підсилювача. Для великих посилень слабких фотострумів застосовують операційні підсилювачі на польових транзисторах з високим вхідним опором (10^{11} Ом) і високоомні резистори R_f .

При обробці сигналів перемінної напруги амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) схеми визначається ємністю фотоосередку й опором R_f .

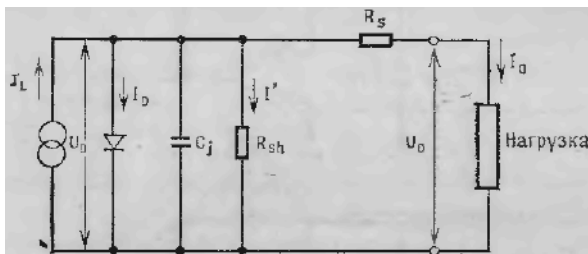


Рис. 3.10. Еквівалентна схема рін-діода.

Якщо в ланцюг зворотного зв'язку операційного підсилювача включити діод, то вийде логарифмічно зростаюча характеристика, найбільш придатна для великих діапазонів вимірів (мал. 3.9,б).

Еквівалентна схема фотодіода може бути представлена у виді ланцюга з джерела струму (I_L), діода (I_D), ємності (C_j), резистора (шунтуючого опору R_{Sh} зі струмом I') і послідовно включеного резистора (R_s) (мал. 3.10). Звідси вихідний

струм виходить рівним

$$I_0 = I_L - I_D - I' = I_L - I_S \cdot \exp\left[\frac{eU_D}{kT} - 1\right] - I',$$

де I_S - струм насичення (фотоосередку), e - заряд електрона, k - постійна Больцмана, T - абсолютна температура.

Тоді вихідна напруга U_0 (при $I_0 = 0$) виходить рівним

$$U_0 = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left[\frac{I_L - I'}{I_S} + 1\right]$$

а вихідний струм короткого замикання (при $R_L = 0$ і $U_0 = 0$)

$$I_{sh} = I_L - I_S \left[\exp e \frac{I_{sh} R_S}{kT} - 1 \right] - \frac{I_{sh} R_S}{R_{sh}},$$

Для випадку, коли опір R_S дуже мало (менш 10 Ом), а опір R_{Sh} дуже великий (більш 107 Ом), обома останніми членами вираження можна зневажити, так що виходить

$$I_{sh} \approx I_L.$$

В основному вони відрізняються геометричними формами. При виборі придатного конструктивного виконання варто враховувати, що ємність рп-переходу C_f зростає при збільшенні його площі і тим самим впливає на АЧХ усієї схеми. Однак, оскільки опромінення відноситься до всієї поверхні, за допомогою детекторів більшої площі можна досягти збільшення вихідного струму. Тому в кожному окремому випадку потрібно оптимальне узгодження.

При монтажі фотоосередків (особливо для Уф-діапазона) варто звертати увагу на те, щоб віконця детекторів перед монтажем були очищені етиловим спиртом.

При пайці необхідно виключати можливість перегріву фотоосередку, причому нагрів кожного спаю допускається максимум до 260°C в плин 5...10 с.

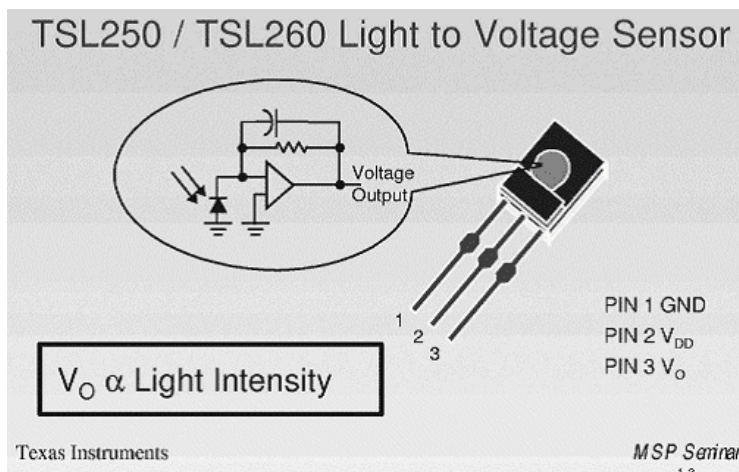
3.2.2. Конвертер світло-напруга

Оскільки перетворення слабких фотострумів вимагає ретельного вибору схем підсилювачів, використаємо конвертер "світло - напруга" у якого великий фотодіод з великою областю об'єднаний з підсилювачем, так що вихідний струм фотодіода перетворений у напругу.

LinCMOS™ процес, використовуваний для низьковольтних операційних підсилювачей адаптований Texas Instruments для датчиків інтенсивності світла, щоб робити інтегровані фотодатчики. Фотодіод у прозорій пластмасі, зроблений із застосуванням цього процесу чуттєвий від 400 nm до 1100 nm (видима й інфрачервона область). TSL250 і TSL230 інтегровані світлові датчики відповідають цілком цьому спектральному діапазону.

TSL250 конвертер "світло - напруга" вирішує деякі основні прикладні потреби. Це особливо придатне рішення для аналогового виміру низьких світлових рівнів у електрично зашумленому середовищі.

Внутрішню схему цього конвертора і його зовнішній вид зображено на мал. 3.11.

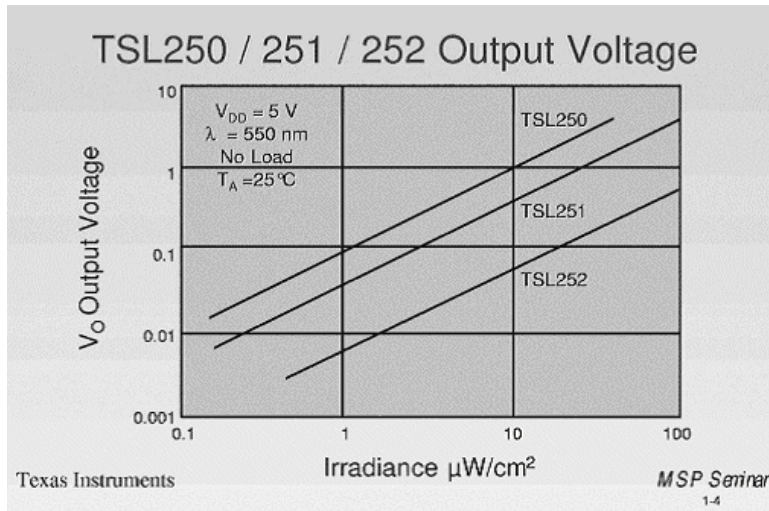


Мал.. 3.11.

Три версії пристрою зроблені, з різними розмірами області фотодіода, і внутрішніми значеннями резистора зворотного зв'язку, дозволяючи встановлювати 3 значення чутливості швидкості.

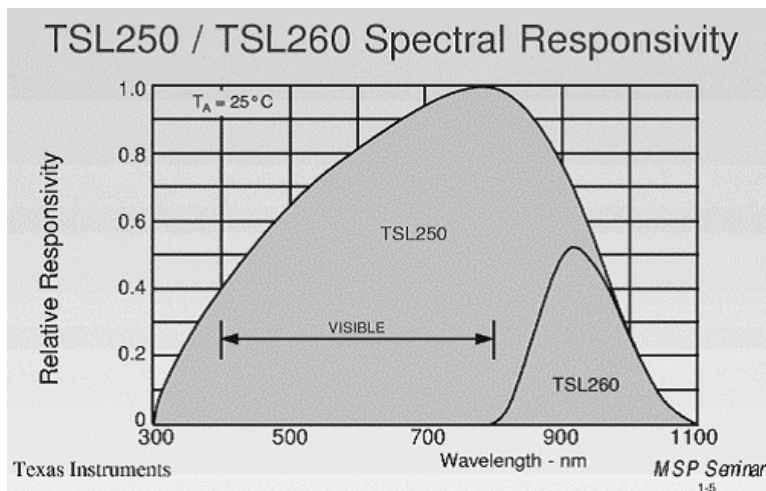
Варіанти Чутливості

TSL250 дає 2V при $25 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



Мал. 3.12.

Сімейство TSL250 відповідає широкому діапазону додатків контролювання світлового рівня в широкому діапазоні.



Мал. 3.13.

LinCMOS™ transimpedance підсилювач (аналог підсилювача TLC272) забезпечує стійке перетворення вхідного сигналу. TSL250 пропонує розширений динамічний діапазон, з лінійним виходом до 3 V, і видає тільки 3 mV у темряві.

TSL250 має істотну перевагу перед дискретними фото датчиками при низькій інтенсивності висвітлення, тому що високоомний вивід діода знаходиться усередині пристрою. Це робить TSL250 менш чуттєвим до зовнішнього

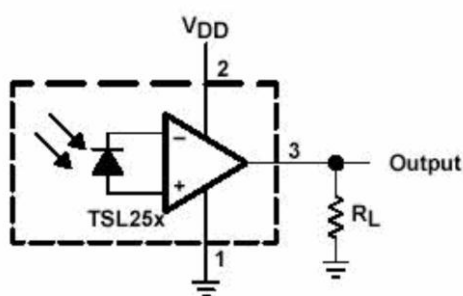
електричного шуму, так що високо стійкий чуттєвий датчик може бути реалізований без дорогих і громіздких методів екранування.

Сімейство TSL250 має високо лінійний, стійкий, низькоомний вихід напруги. TSL250 стійкий до зміни температури, вихідний сигнал змінюється на 1 мікрвольт за 1 градус Цельсія. Це реалізується завдяки тому, що температурний коефіцієнт полікристалічного кремнієвого резистора зворотного зв'язку компенсує температурний коефіцієнт фотодіода.

TSL250 працює від єдиного джерела напруги ($V_{DD} = 5\text{ V}$, працездатність зберігається між 3 V і 9 V), і споживає невеликий струм (800 ма при $V_{DD} = 5\text{ V}$ і висвітленні фотодіода).

Сімейство TSL250 виготовлено в міцній прозорій пластмасі. Для додатків подібно інфрачервоному дистанційному керуванню, де на пристрій не можна впливати навколишнім видимим світлом, встановлюється фільтр блокування видимого світла і датчики виготовляються з пластику, що пропускають інфрачервоний діапазон. Сімейство датчиків, призначених тільки для інфрачервоного діапазону - TSL260, TSL261 і TSL262. Чутливість цих пристроїв менше приблизно в два рази.

Внутрішній зворотний зв'язок у підсилювачі збільшується від TSL252 до TSL250. Оскільки зворотний зв'язок збільшений, швидкість зменшена. Отже TSL252 має найбільшу швидкодію.



Мал. 3.14.

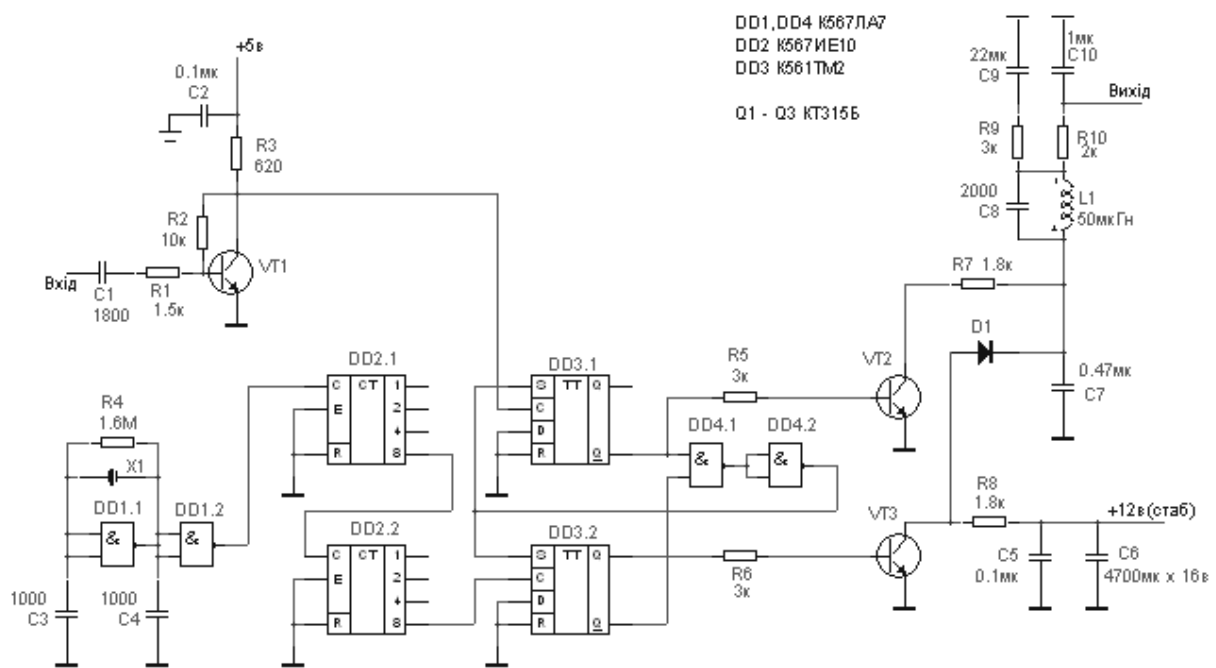
При напрузі живлення 5 V TSL250/TSL260 дають на виході приблизно 3 V - 3.5 V . Використання резистора може розширити лінійний діапазон. Найнижчий

рівень темного отриманий при великому значенні резистора, але це зменшує швидкість. При значення резистора 100 кОм можна вимірювати низькі світлові рівні, рівень темного - 3 mV. Щоб використовувати TSL262 з максимальною швидкістю в цій простій схемі, значення резистора повинне бути зменшене до 1 кОм, і темний рівень збільшиться до 15 mV.

3.3.Частотний детектор

Частотний детектор побудований по схемі з постійною частотою порівняння фазового детектора. Не дивлячись на просту схемотехніку і доступну елементну базу детектор по частоті вихідного сигналу і рівню фазових шумів не уступає значно більш складним пристроям.

Частотний детектор складається з декількох функціональних блоків. Формувач вхідного сигналу складається з транзистора Q1 і додаткових елементів R1,R2,R3, що забезпечують потрібний зсув сигналу. Зсув необхідний для того, щоб подавати сигнал у наступний каскад (фазовий компаратор) тільки логіки КМОП: рівень логічного нуля нижче 0.3Uд.ж., логічної одиниці вище 0.7Uд.ж.. Конденсатор C1 виділяє перемінну складову вхідного сигналу.



Мал. 3.15.

Важливим елементом детектора є опорний генератор. Від його стабільності залежить точність детектування вихідного сигналу. Генератор виконаний на мікросхемі DD1, його елементом, що задає частоту є кварцовий резонатор. Для підвищення стабільності частота опорного генератора ділиться на 64. Ця операція виконується дільником DD2. Саме з частотою, що виходить з дільника і порівнюється вхідний сигнал. Частота порівняння повинна дорівнювати частоті, на яку зрушується опорне випромінювання лазера. Отже частота кварцу повинна бути в 64 рази більше.

Кварцовий резонатор можна замінити на менший з відповідним зменшенням коефіцієнта ділення з 64 до 32 чи 8.

Частоти порівнюються у фазовому детекторі, що складається з елементів DD3, DD4. Фазовий детектор являє собою простий каскад „виключає АБО”. Для гарної його роботи і збільшення діапазону потрібно подавати строго симетричний вхідний меандр. Схема така, що без вхідного сигналу (чи коли він дорівнює опорному) на її виході мається потенціал $U_{д.ж.} / 2$. З цим компаратором смуга спостереження при зміні вхідної частоти залишається в заданих межах при сильних перешкодах. Такий компаратор краще забезпечує спостереження на

частотах, близьких до гармонік опорної частоти. Особливість застосування ФК у тім, що фазовий кут між сигналом і виходом компаратора міняється від 0 до 180°. На центральній частоті цей кут дорівнює 90°-чверть періоду, коли між напругою сигналу і напругою опорного генератора існує рівність частот і кут зрушення відповідає 1/4 періоду. У такий момент вихідна напруга являє собою меандр. Постійна складова такого меандру $U_{д.ж.} / 2$, однак навіть після гарного ФНЧ вихідна напруга має деяку складову другої гармоніки опорної частоти. Ця перешкода найбільше важко переборна. Смуга спостереження з використанням ФК визначається смугою ФНЧ.

Вихідний сигнал знімається з фільтра низкої частоти - ФНЧ: R9, R10, Z9, C10, де імпульсний сигнал, генеруємий фазовим компаратором, згладжується.

Фільтр-пробку L1, C8 набудовують на частоту, на яку зрушується опорне випромінювання лазера -15.625 кГц підбором L1, C8. L1 намотують на будь-якому феритовому кільці діаметром 16..20 мм проникністю 2000..3000НМ. Відношення L/C у цього фільтра не критично.

3.4.Інтегратор

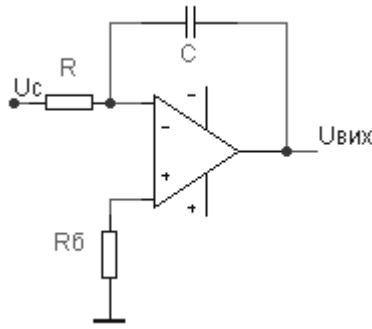
Як відомо, швидкість $V=dS/dt$, де S - переміщення. Якщо ми хочемо одержати вібропереміщення, то потрібно проінтегрувати сигнал віброшвидкості. Для цього ми використовуємо інтегратор.

Найпростіший інтегратор побудований на основі операційного підсилювача, що інвертує, у якому резистор зворотного зв'язку замінений конденсатором.

Вихідна напруга підсилювача описується вираженням:

$$U_{\text{вих}} = -[1/(RC)] \int_0^t U_c(t)dt + U_{\text{вих}_0}$$

де U_c – вхідна напруга, $U_{\text{вих}_0}$ – визначає початкову умову інтегрування $U_{\text{вих}_0}=Q_0/C$, де Q_0 – величина заряду, що була на конденсаторі до моменту початку інтегрування.



Мал. 3.16.

Якщо напруга U_c постійно, то зміна вихідного сигналу описується вираженням:

$$U_{\text{вих}} = -(U_c/RC)t + U_{\text{вих}_0}$$

,тобто вихідний сигнал лінійно зростає з часом.

Вхідний струм інтегратора протікає по опорі джерела сигналу, тому в ланцюг входу, що неінвертує, включений резистор балансування $R_b=R$.

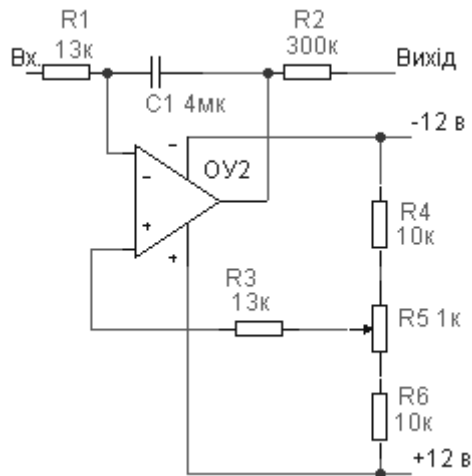
Точність інтегрування багато в чому визначається рівнем електричних втрат у конденсаторі, тому що конденсатор має власну постійну часу $T_0 = R_{i3}$, де R_{i3} - еквівалентний опір ізоляції.

Зменшення помилок при інтегруванні досягається застосуванням активного інтегратора з операційним підсилювачем (мал. 3.17), охопленим зворотним зв'язком.

Ефективна постійна часу інтегрування такої схеми визначається вираженням $\tau=(1+A)\tau'$, де $\tau=R_1C_1$ – постійна часу; A - коефіцієнт підсилення операційного підсилювача.

Помилка інтегрування такої схеми складає $\delta=50[t/(1+A)]\tau$.

Інтегратор виконаний на ОУ К140УД1Б чи К140УД1А, що мають широку лінійну зону (± 8 в) і коефіцієнт підсилення до 4000, що забезпечує високу точність інтегрування. Балансується підсилювач резистором R_5 . Час інтегрування визначається елементами R_1 і C_1 . Помилка інтегрування складає 0.5% від максимального значення сигналу на частотах 1..20 кГц, і близько 1.5% - на частотах 20..100 кГц.



Мал. 3.17.

3.5.ЦАП з USB інтерфейсом

Сигнал вібропереміщення потрібно перетворити в цифрову форму. Якщо обмежити аналізуємий сигнал діапазоном 5 Гц..20 кГц, стане можливим використання аудіо ЦАП. Використовуємо зовнішній аудіо ЦАП з USB інтерфейсом, причому для ОС Windows і більш пізніх не потрібно додаткових драйверів. Після подачі живлення в Control Panel - Multimedia Properties - Audio з'явиться новий пристрій USB Audio Device.

3.6.Основні положення, що враховуються при конструюванні

Досягнення високої надійності електронної системи вимагає використання спеціальних компонентів і методів проектування.

Аналогові і цифрові блоки необхідно розміщати на різних платах і встановлювати в окремих екранованих відсіках корпусу. Цим радикально усувається проникнення в аналогові пристрої ВЧ складових, котрі виникають під час перехідних процесів у цифрових пристроях.

Імпульсні перешкоди, основу яких складають вищі гармоніки, можуть легко проникати в сусідні вузли через загальні ланцюги живлення. Тому аналогові і цифрові пристрої бажано живить від роздільних джерел. Якщо використовується загальне джерело, то необхідно використовувати широкополосні ланцюги розв'язки на основі RC чи LC фільтрів.

Компонування блоків необхідно здійснювати так, щоб обробка сигналів однієї частоти починалася і закінчувалася в межах однієї плати (блоку, модуля, екранованого відсіку).

Провідники друкованих плат і проводи, що несуть струми ВЧ, є антенами, здатними як випромінювати, так і приймати ВЧ коливання, тому довжина таких провідників повинна бути мінімальною, взаємно перпендикулярна прокладка провідників переважніше рівнобіжної.

Часто джерелом паразитної ЧМ чи АМ модуляції є джерело живлення, у якого слабо згладжені пульсації вихідної напруги. Варто передбачити для живлення ФД залишкову величину напруги пульсацій не більш 0.1..0.2 мВ, тобто напруга ФД повинне бути винятково добре згладжена.

Зазначені на схемах номінали резисторів і конденсаторів - усереднені. У конкретних випадках буде потрібно добірка деяких елементів. Так, наприклад, вибір постійної часу ФНЧ залежить від необхідності установки двох суперечливих параметрів - швидкості спостереження за зміною частоти і рівня придушення сигналів опорної частоти (збільшення постійної часу приводить до зниження швидкості спостереження за зміною частоти).

Для запобігання ушкоджень компонентів струмами, що виникають у результаті витоку статичної електрики з рук монтажника, рекомендується прокладати провідники подалі від країв плати. Слід також зазначити, що всі самі строгі заходи для захисту чутливих до електростатичних розрядів компонентів можуть виявитися безглуздими, якщо персонал недбало звертається з платами. Корисно поруч із сигнальними прокладати захисні провідники, що забезпечують витік заряду на землю. В вхідних ланцюгах усіх чутливих елементів рекомендується ставити захисні елементи, наприклад, обмежувальні діоди. Для зниження рівня перешкод і шумів необхідно забезпечити гарне заземлення з низьким імпедансом.

Як і у випадку з окремими компонентами, екранування системи в цілому дозволяє значно знизити шкідливий вплив зовнішніх електромагнітних перешкод. Принцип роботи екрана полягає в чи поглинанні відображенні електромагнітних і

електростатичних полів. На низьких частотах магнітне поле поглинається, на високих - відбивається. Відображення на високих частотах порозумівається невідповідністю між низьким імпедансом металу і високим імпедансом фронту хвилі.

Для захисту від низькочастотних електричних полів рекомендується використовувати екрани з немагнітних матеріалів, наприклад, алюмінію чи міді, тому що вони краще відбивають небажані полючи. Матеріали з високою магнітною проникністю, такі як залізо, залізонікельові сплави, мю-метали і пермалой, використовуються для захисту від низькочастотних магнітних полів. Магнітна проникність цих матеріалів знижується з ростом частоти, тому екрани з них на високих частотах не ефективні. Однак, у цьому випадку добре працюють екрани з міді й алюмінію, тому що вони відбивають падаючу хвилю через різницю імпедансів середовища й екрана. Матеріали з високою провідністю, такі як мідь чи алюміній, є корисними для екранування від електричних полів, але для низькочастотних магнітних полів вони неефективні.

Важливо забезпечити суцільний екран навколо системи, що захищається. Для усунення витоків полючи, всі отвори в екрані повинні мати діаметр, що не перевищує $1/20$, де l - мінімальна довжина хвилі сигналів. Іншими словами, не повинно бути отворів, що працюють як щілинні антени. Невикористовувані рознімання також можуть працювати як антени, тому їхній необхідно закривати поглинаючим матеріалом. Всі ізолюючі елементи повинні мати достатню електричну міцність діелектрика, щоб уникнути пробоя під впливом високого електричного поля. Установка з'єднувачів усередині поглиблень допомагає уникати випадкового контакту з об'єктами, зарядженими статичною електрикою. Усі кабелі, використовувані для введення сигналів усередину екранованого корпусу, повинні бути екранованими, а їхній оплетка повинна мати якісний круговий контакт із корпусом, що дозволить уникнути появи антенних ефектів

3.7. Програмні аналізатори спектра

Програмні аналізатори спектра можна розділити на два основних класи - працюючі в реальному часі і так називані нелінійні (off-line). Перші обробляють звуковий сигнал безпосередньо з АЦП звукової карти, динамічно відображаючи спектр, другі вимагають попереднього запису оцифрованого сигналу в чи пам'ять на диск із наступною обробкою і відображенням спектра - статичного чи динамічного.

Крім цього, частина старих програм-аналізаторів розроблена в розрахунку на "голу машину" (DOS) і деякий середній клас звукових карт (звичайно Sound Blaster Pro чи Gravis Ultrasound), у той час як більш нові орієнтовані на Microsoft Windows, що дає можливість використовувати будь-як звукову карту, у тому числі і не існуючу в момент розробки програми.

Принцип роботи будь-якої програми подібного типу полягає у виконанні над фрагментом оцифрованого звуку операцій швидкого перетворення Фур'є (ШПФ, чи Fast Fourier Transform - FFT), у результаті якого послідовність миттєвих значень амплітуди на тимчасовому відрізку перетвориться в набір амплітуд частотних складових на цьому відрізку, що і відображається у виді спектральної діаграми. Кількість складових, одержуваних у результаті ШПФ, завжди дорівнює ступеня двійки (2-4-8-16-32 і т.д.).

ШПФ тісно зв'язано з поняттям так називаної згладжувальної (windowing) функцією, покликаної усунути "рваний" характер оброблюваного сигналу, породжений кінцевою довжиною кожної групи відліків, обраних для ШПФ. Функція, що згладжує, забезпечує мінімальні вимоги перетворення Фур'є - нульову амплітуду початкового і кінцевого відліків, а в ідеальному випадку - плавне наростання амплітуди сигналу на початку серії і його плавне загасання в її кінці, запобігаючи помилки перетворення і поява сторонніх частотних складових. Такою функцією може бути синус (Hamming, Hanning), трикутник (Parzen), квадратична функція (Welch) чи простої обнуління крайніх відліків (Rectangular).

Перетворення і відображення може бути як статичним - коли однократно обробляється весь заздалегідь записаний сигнал, так і динамічним - коли фрагменти оцифрованого звуку регулярно вводяться прямо зі звукової чи карти заздалегідь підготовленого файлу і так само регулярно відображаються у виді "живого" графіка. У цьому режимі застосовується також "тривимірне" відображення серії миттєвих графіків на осі часу.

При достатній швидкодії комп'ютера можлива робота в реальному часі, коли відображення спектра синхронізоване з вхідним сигналом. Однак, незважаючи на відносно швидкий алгоритм ШПФ, обробка з його допомогою вимагає помітних обчислювальних ресурсів, отчого при недостатці швидкодії приходиться прибігати або до попереднього запису з наступним уповільненим прокручуванням, або до "проріджування" вибірок зі збереженням режиму реального часу.

З програм для DOS найбільш відомі дві, розроблені Philip VanBaren - Freq і Spectrogram, знайти які можна на <ftp://spider.nrcde.ru/pub/sound/other/> під іменами freq4.zip і specgram.zip відповідно. Обидві програми працюють у режимі реального часу; перша виводить миттєві знімки спектральних графіків, а друга - "тривимірний" графік час-частота-амплітуда, у якому амплітуди зображуються кольорами різної яскравості. Пакет freq орієнтований на стандартний VGA-режим (640x480x16), пакет specgram -на VESA-сумісні режими (800x600x256) і вимагає або карти з VESA BIOS, або SVGA-карти з апаратною підтримкою такого режиму і драйвера VBE (VESA BIOS Extension).

Кожна програма зроблена в двох варіантах - для звичайного Sound Blaster і сумісних з ним карт (sbfreq, sbspec) і для Media Vision Pro Audio Spectrum 16 (PAS 16) - freq, specgram. Універсальна версія працює з 8-розрядною оцифровкою (відношення сигнал/шум близько 50 дБ), версія для PAS16 - з 16-розрядною (близько 98 дБ). Однак потрібно мати на увазі, що оцифровку сигналів з рівнем власних шумів на рівні 96-98 дБ реалізують лише деякі професійні карти типу Darla чи Fiji, та й то лише з гарним блоком живлення, системною платою і периферією, а більшість сучасних карт має рівень шуму в районі 75-90 дБ.

Обидві програми одержують параметри роботи з INi-файлів, при цьому ряд параметрів може бути перекритий опціями командного рядка. Крім цього, під час роботи деякі режими можуть бути змінені з клавіатури. Спектр зображується стовбиковою діаграмою, де кожен стовпчик відповідає своїй частотній складовій. Основні параметри програм:

- Частота дискретизації вхідного сигналу - визначає максимальну частоту спектра, рівну половині частоти дискретизації. Для Sound Blaster і сумісних карт частота дискретизації може бути в межах 5000..44100 Гц, для PAS16 вона може досягати 88200 Гц.

- Кількість крапок перетворення Фур'є - визначає точність спектрального графіка, що складається з заданої кількості частотних складових. Число повинне бути ступенем двійки і може бути в межах від 8 до 2048. Збільшення числа крапок сповільнює роботу програм.

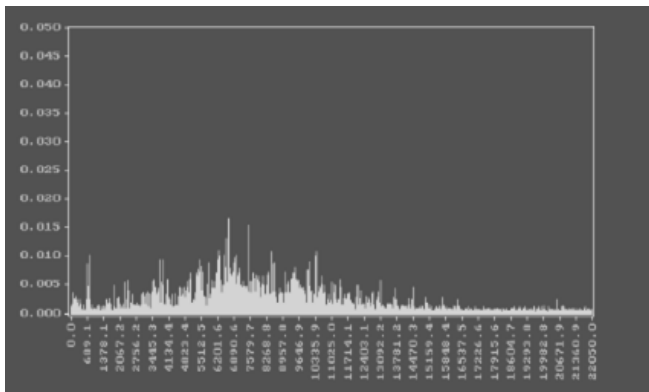
- Вид функції, що згладжує.

- Вид осей графіка - логарифмічні чи лінійні.

- Масштаб частот і амплітуд - початок відліку і ширина області по горизонталі і вертикалі.

- Вид корекції АЧХ - лінійна чи з наростанням (ПРО, 3, 6, 9, 12 дБ/окт).

Використовується для компенсації спаду амплітуд вищих гармонік, даючи можливість більш чітко розглянути їх на графіку. Заодно визначається частота, за якою починається підйом АЧХ (reference frequency). Для freq також може бути заданий режим показу миттєвих значень, коли кожне чергове відображення діаграми стирає попередню картинку, чи режим утримання максимальних значень з їх повільним спадом (decay). Візуально це виглядає, як "підкидання" стовпчиками своїх пікових значень, що потім повільно зсковзують униз.



Мал. 3.21.

Крім статичних параметрів, в активному режимі доступний ряд команд оперативного керування - зміни частоти дискретизації, обсягу ШПФ, логарифмічного/лінійного масштабу осей, підйому АЧХ, виду віконної функції, показу складової з максимальною амплітудою і ряду інших.

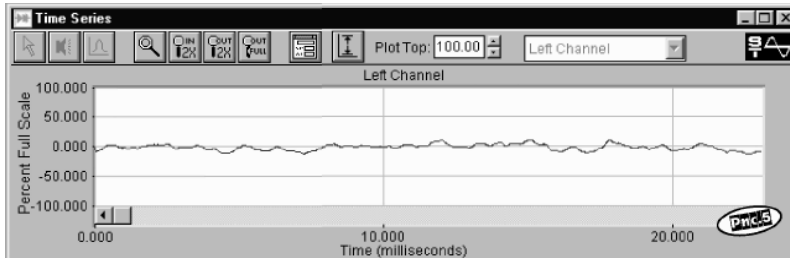
Види екрана при роботі freq показаний на мал. 3.21.

На основі FFT-пакета, зробленого Philip VanBaren, R.S. Номе розроблена проста програма для Windows 3.1 за назвою spectrogram (<http://src.doc.ic.ac.uk/packages/windows3/sounds/gram23.zip>). Вона не підтримує режиму реального часу - замість цього вихідний сигнал спочатку записується чи береться в готовому виді з файлу, і потім по ньому розраховується спектрограма, що відображається у вікні з прокручуванням у "тривимірному" виді, аналогічному виведеному sresgram; у верхній частині вікна відображається звичайна осцилограма сигналу. Програма відслідковує положення курсору миші у вікні спектрограми і видає точні координати (час/частота); на жаль, не передбачений вивід точного значення амплітуди зазначеної складової. Зате, як уже було згадано, програма використовує стандартний інтерфейс зі звуковими пристроями Windows, отчого може "у повну силу" працювати з будь-якою звуковою картою, що має драйвери для Windows.

Дуже функціональна програма для платформ Win32 (Windows 95/ Windows NT, Windows 3.1 + Win32s) за назвою SpectraLAB розроблена компанією Sound Technology Inc. Пакет з SpectraLAB і великого (близько 90 Мб) набору різноманітних звукових прикладів випускається за назвою Spectra PLUS.

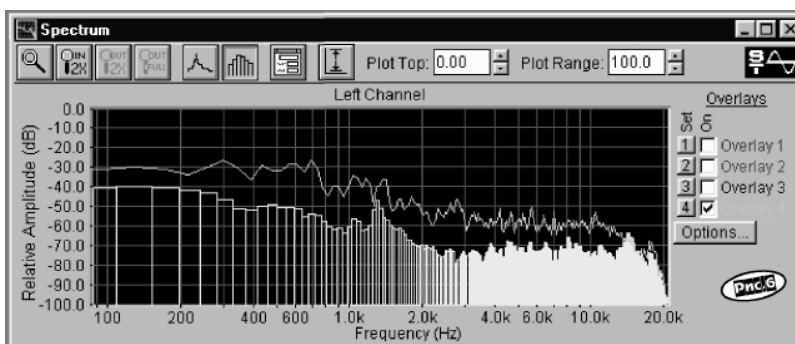
SpectraLAB являє собою надзвичайно могутній засіб аналізу звуку. Результати обробки сигналу можуть відображатися в п'ятих форматах (Views):

- Time Series - звичайна осцилограма (мал. 3.25), Spectrum - "миттєва" спектрограма (мал. 3.26.) на зразок виведеної freq.



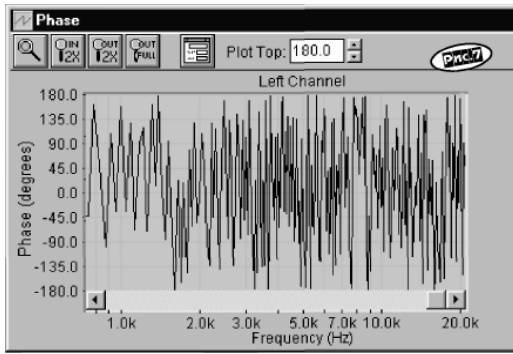
Мал. 3.22.

- Спектр може відображатися у виді лінійного графіка чи стовпчикової діаграми. Пункти Overlay служать для рівнобіжного відображення у вікні до чотирьох допоміжних спектральних графіків різних колборів, з якими можна візуально порівнювати динамічний спектр. Кнопки Set роблять "миттєвий знімок" поточного спектра у відповідний допоміжний графік. Графіки можуть бути збережені у файли і згодом завантажені з них.



Мал. 3.23.

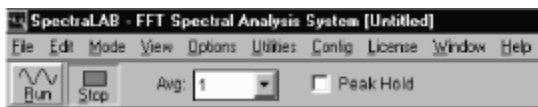
- Phase - графік зміни фаз частотних складових (мал.3.24)
- Spectrogram - "тривимірна" динамічна спектрограма на зразок виведеної Spectrogram
- 3D Surface - вид "функціональної поверхні", на якій серія спектральних графіків зображується в перспективі.

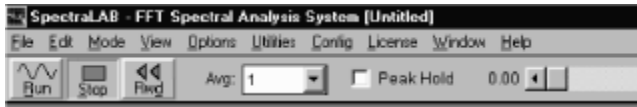
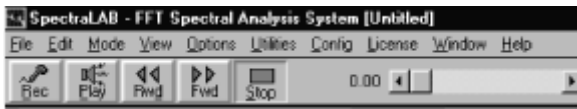


Мал. 3.24.

Кожен формат відображається в окремому вікні, одночасно може бути відкрита будь-яка комбінація вікон з рівнобіжним відображенням процесу в кожному з них. Параметри Plot Top і Plot Range задають верхню границю і діапазон амплітуд при висновку зображення.

SpectraLAB працює в трьох режимах (Modes): Real Time (реальний час), Recorder (те ж, із записом) і Post Process (обробка раніше записаного звуку). У режимі реального часу сигнал із входу відразу ж піддається обробці і відображенню, у режимі запису він паралельно записується в пам'ять чи дисковий файл із можливістю наступного багаторазового прогону, у режимі обробки сигнал спочатку вводиться з файлу (формати WAV, WFP, а також послідовність числових значень відліків у текстовому чи двоїчному виді). Вид основної панелі інструментів (Toolbar) програми в кожному із трьох режимів (мал. 2.25).





Мал. 3.25.

Параметр Avg (Averaging - усереднення) задає кількість проходів ШПФ перед кожним виводом зображення; результати декількох проходів усереднюються перед висновком. Для швидкозмінюючихся сигналів рекомендуються менші значення параметра, для зашумлених - великі.

Пункт Peak Hold включає утримання пікових значень, коли висота кожного спектрального стовпчика може тільки збільшуватися при перевищенні раніше досягнутого пікового значення.

Кнопка зі стрілкою у вікнах, що мають тимчасову координату, доступна в режимах запису і післяобробки і дозволяє рухом миші виділити ділянку сигналу для наступних операцій копіювання, вирізки, вставки, фільтрації, програвання і т.п. Для вікон, що не мають цієї координати, доступні лише кнопки масштабування зображення з зображенням лупи.

Кожне вікно перегляду має набір власних параметрів (Properties) відображення - масштаби по осях координат, кольору графіків і ліній координатної сітки, діапазони частот для спектральних графіків, частота відновлення зображення, напрямок висновку спектрограм і т.п. Крім цього, кожне вікно має контекстне меню, активізуєме правою кнопкою миші усередині області графіка й утримує команду копіювання умісту вікна в буфер (у виді оцифровки, чи картинки серії числових значень у виді рядків ASCII), фільтрації обраного фрагмента, а також обчислення різних величин - потужності сигналу, усередненого спектра, інтеграла і т.п.

У меню Settings задаються різні глобальні настроювання програми.

Options (параметри) - розрядність відліків, частота оцифровки, коефіцієнт її зниження (decimation), обсяг ШПФ, вид функції, що згладжує, кількість каналів і різниця фаз між ними, контроль перевантаження, а також ступінь взаємного перекриття блоків ШПФ для режиму післяобробки:

Пункт Dual Channels Processing пропонує ряд могутніх можливостей двухканальної обробки - обчислення перехресних спектрів (Cross Spectrum), передатних функцій і ступеня когерентності (аналог статистичного коефіцієнта кореляції).

Scaling (масштабування) - вид осей амплітуди (лінійна/ логарифмічна) і частоти (лінійна, логарифмічна, октавна або 1/3, 1/6, 1/9, 1/12 чи 1/24 октави), а також крива компенсації АЧХ мікрофона, що завантажується з файлу чи задається серією пар "частота - рівень", по яким за допомогою кубічного сплайна інтерполюється повна крива.

Trigger (запуск) - умова запуску процесора програми. Містить граничне значення (threshold), його вид (level - абсолютне перевищення рівня, edge - стрибок із заданою амплітудою), полярність, зрушення за часом початку роботи процесора від моменту спрацьовування (вперед чи назад), канал, у якому аналізуються умови запуску, а також режим циклічного перезавпуску (Re-Arm). При досягненні умови запуску процесор відпрацьовує визначений обсяг даних (у режимах реального часу і постобробки - кожен блок ШПФ, у режимі запису - одна секунда):

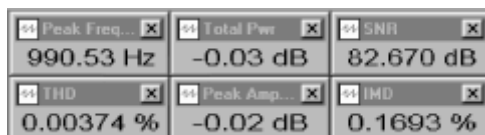
Calibration (калібрування) - настроювання програми по еталонному сигналу з завданням його параметрів.

Markers - завдання до шести обраних частот і/чи амплітуд, що будуть окремо позначатися на графіках - кольором, оцінками на осях чи координат стрільцями замість стовпчиків у спектрограмі. Можуть використовуватися, наприклад, для виділення значень, що мають який-небудь особливий зміст.

Меню Utilities дозволяє виконати ряд додаткових корисних операцій. Насамперед це Signal Generator - генератор різних сигналів, якими можуть бути білий і рожевий шуми, синусоїдальні сигнали (1 кГц чи набір з десяти сигналів

заданих частот і рівнів), переривчасті (Burst) сигнали, пілкоподібний, трикутний і прямокутний сигнал, одиночні імпульси, тестові сигнали для обчислення коефіцієнта інтермодуляційних перекручувань (IMD) і довільні хвильові форми з WAV-файлів. Результат роботи генератора також може бути збережений у WAV-файлі.

Крім цього, з Utilities можна відкрити ряд додаткових маленьких вікон (мал. 3.26), що відображають корисні значення, обчислені за результатами обробки: Peak Amplitude - пікова амплітуда, Peak Frequency - частота пікової складовий, Total Power - загальна потужність сигналу, Total Harmonic Distortion - відсоток гармонійних перекручувань (+ Noise - разом із шумом), Intermodulation Distortion - відсоток інтермодуляційних перекручувань, Signal to Noise Ratio - відношення сигнал/шум. Останні чотири режими вимагають подачі синусоїдального сигналу на вхід карти; для THD рекомендується частота 1 кГц, для IMD - два тони різної частоти, для SNR частота тону може бути кожний. SNR обчислюється як відношення потужності пікової спектральної складової до потужності всіх інших складових сигналу.



Peak Freq...	Total Pwr...	SNR
990.53 Hz	-0.03 dB	82.670 dB
THD	Peak Amp...	IMD
0.00374 %	-0.02 dB	0.1693 %

Мал. 3.26.

При роботі в двухканальному режимі стає доступною функція Delay Finder (визначення затримки), за допомогою якої можна визначити відносну затримку звуку між каналами. Наприклад, підключивши до виходу гучномовець, а до входу - мікрофон, можна визначити час проходження звуку від гучномовця до мікрофона - прямо чи після відображення від чи стін стелі приміщення. Обчислена затримка може бути потім компенсована шляхом автоматичного внесення її в параметри процесора кнопкою Apply to Processing Delay.

І нарешті, пункт Data Logging дає можливість реєструвати відображувані в одному з вікон результати в текстовому файлі, у виді рядків, що містять часові

мітки і власне числові значення. Як і висновок у вікнах, реєстрація у файлі може виконуватися з гранично можливою швидкістю або з заданим інтервалом, і також може бути обмежений діапазон прийнятих в увагу частот.

Безсумнівно, SpectraLAB є найбільш могутньою й універсальною з відомих програм спектрального аналізу, що використовують тільки програмну обробку цифрового звуку.

При записі і дослідженні сигналу з входу звукової карти не можна забувати про те, що АЦП пропускає тільки частоти, менші половини частоти дискретизації (межа для більшості простих карт складає 44.1 чи 48 кГц), а в ряді карт АЧХ помітно псується у верхній частині, тому реальну границю частотного діапазону конкретної карти можна визначити тільки експериментально.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

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

Охорона праці спирається на комплекс державних законодавчих актів. Загальними законами України, що визначають основні положення щодо охорони праці є Конституція України, Кодекс законів про працю, Закон України “Про охорону праці”, Закон України “Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення”, Закон України “Про пожежну безпеку”, Закон України “Про загальнообов’язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності” та підзаконні акти щодо охорони праці.

Всі закони і підзаконні акти з охорони праці базуються і відповідають Основному Закону держави – Конституції України, яка гарантує право громадян

України на працю, яку вони вільно обирають, або на яку вільно погоджуються, на належні, безпечні і здорові умови праці, на відпочинок і на соціальний захист.

Основним законодавчим документом щодо охорони праці є Закон України “Про охорону праці”, який прийнятий Верховною Радою України 14 жовтня 1992 року.

Задачі техніки безпеки спрямовані на попередження нещасливих випадків на виробництві. Вони зважуються на всіх етапах створення й експлуатації авіаційної техніки.

Небезпечний (виробничий) фактор – виробничий фактор вплив якого в певних умовах може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров’я працівника.

Шкідливий (виробничий) фактор – виробничий фактор вплив якого може призвести до погіршення стану здоров’я зниження працездатності працівника.

Умова праці – сукупність факторів виробничого середовища які впливають на здоров’я і працездатність людини в процесі її професійної діяльності.

Виробниче середовище – сукупність фізичних, хімічних, біологічних, соціальних факторів, що діють на людину в процесі трудової діяльності.

Міжгалузеві і галузеві акти з охорони праці – закони, міжгалузеві і галузеві стандарти, норми, правила, положення, інструкції і інші документи з охорони праці, яким надається сила правових норм обов’язкових для виконання.

Нагляд за охороною праці – одна з форм діяльності державних органів по дотриманню вимог законів і інших нормативних актів з охорони праці встановлених державною владою.

4.1. Перелік небезпечних та шкідливих виробничих факторів при технічній експлуатації

У процесі праці у виробничій обстановці на людину може впливати або один, або ряд небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Для запобігання цих впливів на працівників при розробці нових приладів, контрольних установок і стендів повинні виконуватися вимоги по охороні праці.

Державним стандартом ГОСТ 12.0.003-74 (1999) ССБТ «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация», усі небезпечні і шкідливі виробничі фактори класифіковані на наступні групи: фізичні, хімічні, біологічні і психофізіологічні. Згідно ГОСТ 120.003-74 при виконанні технічного обслуговування можливі наступні фактори:

- Підвищене значення напруги на електричному ланцюзі, замкнення якої може бути через тіло людини.

Найчастіше зв'язані з неправильним устроєм електротехнічних установок, відсутністю заземлення, застосуванням голих проводів, шин, відкритих частин рубильників, електроламп і інструмента недосконалої конструкції та ін.

Небезпека електричного струму полягає в тому, що він не виявляється органами почуттів людини і часто зненацька виявляється на неструмоведучих частинах електроустановок і конструкціях, тобто там, де його не повинно було бути. Ступінь небезпеки поразки людини електричним струмом залежить від ряду факторів: значення сили струму, роду і частоти струму, тривалості дії, шляху протікання, стану організму, фактора уваги й умов зовнішнього середовища. Значення струму, що протікає через тіло людини, є основним чинником, що визначає ступінь поразки. Для проектування способів і засобів захисту людей при взаємодії їх з електроустановками ГОСТ 12.1.038 – 82. ССБТ. «Допустимые уровни напряжений прикосновения и токов», визначені гранично допустимі значення напруги дотику і струмів, що протікають через людину в аварійній ситуації.

- Підвищений рівень шуму на робочому місці.

Шум і вібрація, що перевищує стандартні норми, негативно впливають на організм людини (ГОСТ 54 72001-78). Основні джерела виробничого шуму і вібрації - шум при випробуванні авіадвигунів.

Шум є загально біологічним дратівним фактором і у визначених умовах може впливати на всі органи і системи організму людини. Його вплив на органи слуху, різні відділи головного мозку приводить до підвищеної втоми, загальній слабості, дратівливості і т.д.

- Недостатня освітленість робочої зони при перевірках устаткування в лабораторних умовах і на літаку (ГОСТ 54 72003-82).

При правильно розрахованому і виконаному освітленні виробничих приміщень очі працюючого протягом тривалого часу зберігають здатність добре розрізняти предмети і знаряддя праці, не стомлюючись. В умовах цивільної авіації при оперативному технічному обслуговуванні незадовільне освітлення зони обслуговування може призвести до погіршення якості виконуваних робіт.

Недостатнє освітлення робочих місць може виникати з таких причин: забруднення та недостатня кількість або працездатність деяких або усіх освітлювальних приладів; невірно підібрані чи замінені лампи в світильниках; невірне розташування сусідніх будівель.

Виробниче освітлення може бути двох видів: природне і штучне. Природне освітлення створюється за рахунок сонячного світловипромінювання. Рівень природної освітленості залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, висоти сонця над горизонтом, стану атмосфери і деяких інших факторів, що не піддаються точному облікові. Для створення штучного освітлення застосовують електричні лампи накаливання і люмінесцентні лампи. Проектування штучного освітлення ґрунтується на його розрахунку, що визначає необхідну кількість світильників і їхню потужність.

Недостатнє освітлення робочих місць є однією з причин низької продуктивності праці. При недостатньому освітленні очі працюючого сильно напружені, при цьому ускладнюється розрізнення інструментів і навколишніх приладів, знижується темп роботи і погіршується загальний стан.

Освітлення виробничих приміщень і робочих місць характеризується світловим потоком, силою світла, освітленістю, яскравістю, контрастністю. Рациональне освітлення повинне задовольняти ряд вимог: бути достатнім, щоб око без напруги могло розрізнати розглянуті деталі; постійним у часі, тому напруга в живильній мережі не повинне коливатися більше, ніж на 4%.

- ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. «Пожарная безопасность. Общие требования»;
- ГОСТ 12.1.010-76 «Взрывобезопасность. Общие требования»;
- ГОСТ 12.1.030-81. ССБ. «Электробезопасность. Защитное заземление, зануление»;
- ГОСТ 12.1.044-84 «Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения».

Запобігання пожежі досягається за рахунок недопущення утворення в пальному середовищі джерел запалювання. Такими джерелами при експлуатації розроблювального приладу можуть стати його несправність, перевантаження або неправильний монтаж блоків системи, що перевіряється, що приводить до підвищеного нагрівання або до короткого замикання. Шляхом усунення цих причин, можна сказати, що конструкція задовольняє вимогам електростатичної безпеки відповідно до ГОСТ 12.1.018-93. ССБТ. «Пожароискробезопасность статического электричества».

4.2. Інструкція з охорони праці під час експлуатації проектного об'єкту

4.2.1. Основні положення

1. Ця інструкція розроблена у відповідності з вимогами нормативних актів з охорони праці та обов'язкова до виконання усіма працівниками.

2. До роботи з проектованим об'єктом допускаються особи інженерно-технічної сполуки, що вивчили проектований пристрій, інструкцію з технічної експлуатації, дану інструкцію і ті, які склали залік по техніці безпеки і пожежної безпеки.

3. Працівник зобов'язаний:

- твердо знати і строго дотримуватись правил внутрішнього розпорядку, правил з охорони праці, не допускати на робочому місці паління і вжитку спиртних напоїв;

- на роботу з'являтися в призначений час, приймати участь у змінно-зустрічних зборах. Хворі та особи у нетверезому стані до роботи не допускаються і повинні бути відправлені у медичний заклад для перевірки стану здоров'я;

- знати, що основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі з електродвигуном є поразка електричним струмом, рухомі незагороджені елементи літака, виступаючі елементи АіРЕО (антени, датчики, ПВД та ін.), недостатній рівень освітлення у технічному відсіку.

4.2.2. Вимоги безпеки перед початком роботи

працівник зобов'язаний:

- надягти й упорядкувати робочий одяг, надягти головний убір і підібрати під нього волосся;

- перевірити оглядом технічний стан робочого місця, забрати з робочого місця усе, що може перешкодити роботі;

- перевірити справність устаткування, пристосувань, інструмента, вентиляції, місцевого освітлення. Не працювати на устаткуванні з простроченими термінами огляду.

4.2.3. Вимоги безпеки під час роботи

Для забезпечення безпечної організації праці працівник зобов'язаний:

- забезпечити відсутність людей в зоні переміщення підвісних елементів літака (закрилки, рульові поверхні) на протязі всього періоду робіт по обслуговуванню протиобліднювальної системи;

- не знаходитися поблизу автоматично діючих механізмів, не заходити за огорожу, не знімати та не встановлювати огорожу під час їх роботи;

- переміщатися та оглядати АіРЕО з землі необхідно згідно з розробленими та затвердженими безпечними маршрутами обходу літака, які виключають можливість зіткнення інженерно-технічного складу з виступаючими або рухомими частинами літака;

- не допускається при експлуатації електродвигуна встановлювати запобіжники, які не відповідають номіналу, а також закорочувати їх дротом;
- при виконанні робіт суворо керуватися технологічними вказівками по тій або іншій перевірці;
- забороняється підключати або відключати роз'єми, які знаходяться під струмом;
- періодично необхідно перевіряти надійність з'єднання штепсельних роз'ємів;
- при знаходженні пошкодження ізоляції з'єднувальних кабелів знеструмити електродвигун і відправити його в ремонт;
- огляд, наладку, чистку, змазку, догляд та ремонт електродвигуна виконувати після його повної зупинки та відключенні;
- не притулятися до струмопровідних частин;
- забезпечити достатній рівень природного або штучного освітлення при виконанні робіт в технічному відсіку. Штучне освітлення повинно відповідати вимогам стандарту ГОСТ 5472003-82, а саме: освітлювальні прилади для загального та місцевого освітлення повинні забезпечувати нормовані кількісні та якісні характеристики для освітлювальних пристроїв. Їх вибір слід проводити у відповідності з вимогами Сніп-4-79. Світильники місцевого освітлення повинні оснащуватись світлорегуляторами. Повинні дотримуватись норми освітленості: при загальному освітленні – 300 лк, при комбінованому – 700 лк;
- до робіт на літаку слід приступати при умові виконання вимог галузевого стандарту ГОСТ 5471004-82 і після приєднання корпусу літака до стаціонарного заземлюючого пристрою на стоянці літаків;
- підключення наземних джерел електричної енергії до бортової електричної мережі літака, а також їх відключення виконувати у відповідності з вимогами ГОСТ 5430030-84;
- забороняється використовувати у якості переносних електричних освітлювальних пристроїв – освітлювачів напругою 220 В, а також освітлювачів, не обладнаних захисним склом (сіткою);

- при наявності підвищеного рівня шумів на робочому місці необхідно застосовувати шумоподавляючі навушники;

- використовувати захисні окуляри, сітки, каски і іншими захисними пристроями при виконанні усіх видів робіт, які супроводжуються відлітанням осколків;

- при виникненні виробничої ситуації, небезпечної для життя чи здоров'я працюючих, роботи повинні бути негайно припинені і виконавець робіт повинен повідомити безпосереднього керівника.

4.2.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

По закінченню роботи працівнику необхідно:

- у встановленому порядку вимкнути обладнання, пристрої та апаратуру, всі перемикачі встановити в початкове положення, знеструмити електродвигун.

Або передати зміну при безперервному процесі;

- прибрати відходи виробництва;

- після закінчення робіт необхідно прийняти душ, використовуючи резинове взуття на неслизькій підшві для запобігання падіння;

- повідомити керівника про всі недоліки, що виявилися у процесі роботи.

4.2.5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Знеструмити устаткування, припинити роботу, з'явитися в розпорядження старшого зміни і докласти про подію.

Основними причинами виникнення пожежі при проведенні ТЕ обладнання є:

- короткі замикання елементів ланцюгів;

- встановлення запобіжників, що не відповідають номіналові;

- неправильний вибір проводів у схемі підключення;

Для попередження виникнення пожежі пропонуємо вжити заходів по кожному з перерахованих вище пунктів, а саме:

- періодично перевіряти надійність роз'ємів, особливо в місцях з'єднання проводів зі штепсельними розніманнями. Місця підключення до зовнішніх пристроїв надійні по міцності і пайці;

- не встановлювати «жучки» і запобіжники, що не відповідають номіналові;

- зробити перевірку правильності вибору сполучних проводів.

У випадку виникнення пожежі застосовувати вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-2 або водопінний аерозольний типу ВВПА-400. Рекомендується встановити в лабораторії не менше 2-х вогнегасників

РОЗДІЛ 5

ЛАЗЕРНА БЕЗПЕКА

Лазерні технології невіддільно увійшли практично в усі сфери діяльності. Лазерна галузь інтенсивно розвивається, продовжує отримувати нові застосування і відкривати нові можливості. Але чудові властивості лазерного випромінювання, які сприяють виконанню безлічі технологічних операцій над різноманітними матеріалами, разом з тим створюють і високу небезпеку ураження людини.

Висока потужність лазерного випромінювання веде до можливості поразки за короткий час. Малий розмір пучка сприяє зосередженню енергії на локальній ділянці. Через малу розбіжність зберігається небезпека ураження при поширенні пучка на великі відстані. Залежно від умов опромінення можна отримати поверхневий опік шкіри, небезпечно підвищити внутрішньоочний тиск, пошкодити сітківку ока. Біологічні ефекти впливу лазерного випромінювання на організм визначаються механізмами взаємодії випромінювання з тканинами (теплової, фотохімічний, ударно-акустичний та ін.) І залежать від довжини хвилі випромінювання, тривалості впливу, тривалості окремих імпульсів, частоти проходження імпульсів, площі опромінюваної ділянки, а також від біологічних і фізико-хімічних особливостей опромінюваних тканин і органів.

Звичайно, правила експлуатації лазерів передбачають використання захисних окулярів, лицьових щитків і насадок, захисного спецодягу, наявність попереджувальних написів та розпізнавальних знаків, проведення

медичного огляду персоналу, застосування засобів дозиметричного контролю і пристроїв блокування, що переривають роботу випромінювача в разі небезпеки. Однак лазерні технологічні установки містять не тільки сам генератор квантового випромінювання і захисний корпус, а часто включають напрямні дзеркала і призми, лінзи, світловоди. Не виключена небезпека, що пучок випромінювання випадково відіб'ється і пошириться далеко в сторону від установки. При цьому наявність небезпеки від невидимого випромінювання може бути неочевидна.

Взагалі при експлуатації лазерних установок на обслуговуючий персонал можуть впливати наступні небезпечні і шкідливі фактори:

- лазерне випромінювання (пряме, відбите і розсіяне);
- супутні ультрафіолетове, видиме і інфрачервоне випромінювання від джерел накачування, плазмового факела і матеріалів мішені;
- висока напруга в ланцюгах управління і джерелах електроживлення;
- електромагнітне випромінювання від рентгенівського до радіочастотного діапазону, яке може виникати від елементів лазерної установки;
- підвищена температура поверхонь оброблюваного виробу;
- шум;
- вібрація;
- продукти взаємодії лазерного випромінювання з робочими матеріалами;
- токсичні гази і пари від лазерних систем з прокачуванням, систем охолодження та ін .;
- небезпека вибуху в системах накачування лазерів; - напруженість функцій аналізаторів (зір, слух).

При експлуатації і розробці лазерних виробів необхідно враховувати також можливість вибухів і пожеж при попаданні лазерного випромінювання на горючі матеріали.

5.1 Визначення параметрів лазерного пучка

5.1.1. Співвідношення енергетичних і просторових параметрів лазерного пучка

Реальні лазерні пучки можуть мати різну геометричну структуру і розподіл інтенсивності по перетину. Відома велика кількість промислово випускаються лазерів, що працюють в одномодовому режимі, тобто випромінюючих на основній поперечної моді TEM_{00} . Розподіл інтенсивності в перетині таких пучків с хорошою точністю можна апроксимувати функцією Гауса. У многомодовому режимі роботи інтенсивність в перерізі пучка розподілена випадковим чином (особливо для імпульсних лазерів). Для простоти в подальшому будемо вважати, що при роботі лазера в многомодовому режимі розподіл інтенсивності рівномірно по перетину пучка.

У паспортних даних лазерів зазвичай вказуються довжина хвилі випромінювання, потужність (при безперервному режимі роботи), енергія в імпульсі (при імпульсному режимі роботи), розбіжність випромінювання, діаметр пучка на виході лазера, частота проходження і тривалість імпульсів.

Основні просторові параметри гауссова лазерного пучка - розбіжність пучка θ , рад; конфокальний параметр $2d_{\text{л}}$, м; радіус перетяжки $r_{\text{пер}}$, м (рис. 5.1). Під расходимістю лазерного випромінювання можуть розуміти різні характеристики. Просторова расходимість визначається плоским тілесним кутом на заданому рівні інтенсивності, який встановлюється по відношенню до її максимального значення. І розрізняють енергетичну расходимість, яка визначається за заданою часткою енергії або потужності, укладеної всередині конуса розбіжності. Діаметр d_0 лазерного пучка, пов'язаний лінійно з расходимістю, визначається аналогічно як діаметр поперечного перерізу пучка лазерного випромінювання, всередині якого проходить задана частка енергії або потужності.

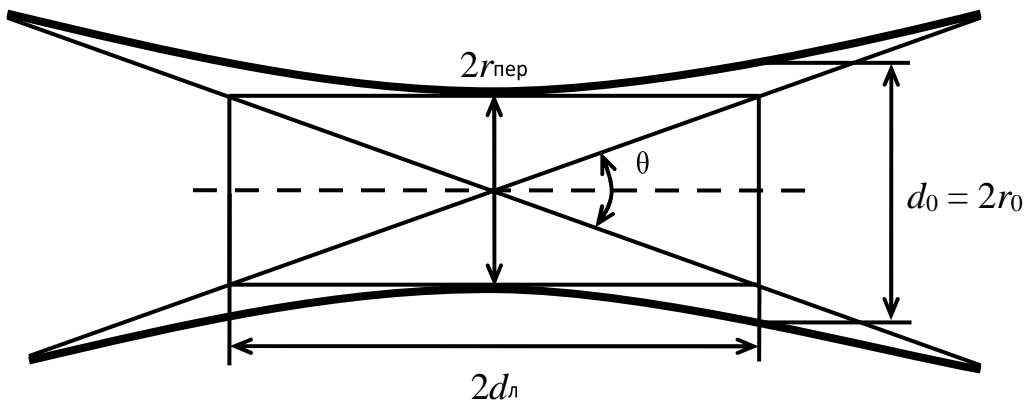


Рис. 5.1. Основні просторові параметри гауссова пучка

Позначимо рівень обмеження просторової розбіжності через m , відповідну розбіжність - θ_m , рад; радіус перетину лазерного пучка - r_m , м. Рівень обмеження енергетичної розбіжності позначимо через n , енергетичну расходимість - θ_n , рад; радіус перетину пучка - r_m , м.

Найбільш вживаними значеннями рівнів обмеження m в даний час є: 0,5; 1/e; 1/e² (обмеження по інтенсивності), а рівня обмеження n - 0,7 і 0,9 (обмеження по частці енергії).

Далі в розрахунках ми будемо застосовувати тільки рівень m обмеження розбіжності θ_m , рівний 1/e², тому для спрощення при позначенні розбіжності і радіусу перетину пучка індекс будемо опускати: θ і r .

Розподіл енергетичної освітленості в перерізі гаусового пучка описується виразом:

$$E = E_{max} \exp(-2h^2 / r^2), \quad (5.1)$$

де E - енергетична освітленість в даній точці перетину пучка,

Вт/м²; E_{max} - енергетична освітленість на осі пучка; h - відстань від осі пучка до даної точки, м; r - радіус перетину пучка при обмеженні розбіжності за рівнем 1/e², м. З формули (5.1) випливає:

$$m = E / E_{max} = \exp(-2h^2 / r^2). \quad (5.2)$$

де r_m - радіус перерізу пучка при обмеженні за рівнем m , м. Тоді можна показати, що:

$$r = r_m / \sqrt{0,5 \ln m} = r_m K \quad (5.3)$$

де через K позначається коефіцієнт приведення.

Неважко побачити, що для гауссових пучків існує простий зв'язок рівнів обмеження m і n : $n = 1 - m$.

Значення коефіцієнта приведення K залежно від рівнів обмеження m або n наведені в табл. 5.1. Там також дані формули для приведення чисельного значення розходження і радіуса пучка до рівня обмеження по інтенсивності $1/e^2$. Неважко бачити також, що:

$$\theta m_1 K_1 = \theta m_2 K_2 . \quad (5.4)$$

Таблиця 5.1

Рівні обмеження просторового розходження m	Рівень обмеження енергетичного розходження n	Коефіцієнт приведення K	Формули приведення
0,1	0,9	0,932	$\left. \begin{aligned} \theta &= \theta_m \cdot K \\ r &= r_m \cdot K \theta \\ &= \theta_n \cdot K r \\ &= r_n \cdot K \end{aligned} \right\}$
$1/e^2$	0,865	1,000	
0,2	0,8	1,114	
0,3	0,7	1,288	
$1/e$	0,632	1,414	
0,4	0,6	1,478	
0,5	0,5	1,698	

Розподіл енергетичної освітленості в перерізі гаусового пучка лазера визначається наступною формулою:

$$E = -\frac{2P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2h^2}{r^2}\right), \quad (5.5)$$

де P - потужність безперервного випромінювання, Вт.

Залежність радіусу перетину пучка r від відстані a вздовж осі пучка обчислюється з виразу:

$$r_m = -\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{d_a^2 + a^2}, \quad (5.6)$$

де a - відстань від перетяжки до даного перетину пучка (для простоти а вважається далі від центру резонатора), м. Конфокальної параметр $2d_a$ можна

розрахувати за паспортними даними лазера:

$$2d_{\text{л}} = 8\lambda / \pi \theta^2. \quad (5.7)$$

Якщо в паспорті розбіжність пучка задана на рівні 0,5, потрібно привести її значення до рівня $1/e^2$ (по табл. 5.1).

Для інженерних розрахунків зручно користуватися наближеною формулою:

$$r = r_0 + \left(\frac{\theta l}{2}\right), \quad (5.8)$$

де $2r_0 = d_0$ - початковий діаметр пучка (на вихідному отворі лазерної установки), м; l - відстань від вихідного дзеркала лазера, м.

З точки зору безпеки, найчастіше досить розрахувати максимальну енергетичну освітленість (на осі пучка):

$$E_{\text{max}} = 2P/\pi r^2. \quad (5.9)$$

Для знаходження енергетичної освітленості пучка лазерного випромінювання з рівномірним розподілом інтенсивності в перерізі використовується співвідношення:

$$E_{\text{рав}} = P/\pi r^2, \quad (5.10) \text{ де } r \text{ визначається за формулою (5.8).}$$

Всі наведені формули і співвідношення дані для лазерів з безперервним випромінюванням. Для імпульсного режиму роботи лазерів слід в формулах замінити потужність безперервного випромінювання P (Вт) енергією імпульсного лазерного випромінювання W (Дж), енергетичну освітленість E (Вт/м²) енергетичної експозицією H (Дж/м²).

5.1.2. Параметри лазерного пучка, перетвореного оптичною системою

У багатьох пристроях за допомогою оптичної системи здійснюється управління режимом випромінювання і взаємодією пучка випромінювання з об'єктом. Оптична система може бути застосована для збільшення або зменшення діаметра пучка, розбіжність або фокусування лазерного пучка і ін. Розрахунок нормованих параметрів лазерного випромінювання, що пройшов через оптичну систему, проводиться так само, як і для прямого опромінення, але за вихідні дані приймаються параметри пучка, перетвореного оптичною системою. Якщо відомі параметри оптичної системи і пучка лазера, то параметри перетвореного пучка

розраховуються.

Так, при використанні однокомпонентної оптичної системи конфокальний параметр перетвореного гауссова пучка $2d'_л$, його розбіжність θ' і потужність P' визначаються за такими формулами:

$$2d'_л = \frac{2(f')^2 d_л}{(f' + a)^2 + d_л^2}, \quad (5.11)$$

$$\theta' = \theta \sqrt{d'_л / d_л}, \quad (5.12)$$

$$P' = P \cdot \tau_{oc}, \quad (5.13)$$

де $d_л$ - половина конфокального параметра пучка лазера, м; f' - фокусна відстань оптичної системи, м; τ_{oc} - коефіцієнт пропускання оптичної системи для довжини хвилі λ лазерного випромінювання. Якщо оптична система - багатоконпонентна, то послідовно розглядаються параметри пучка після перетворення кожним елементом оптичної системи.

Дуже типовим випадком є відображення лазерного пучка від першої поверхні оптичної системи (лінзи, об'єктива, призми і т.п.), а іноді небезпечні відображення можуть бути і від подальших поверхонь оптичної системи. Форми перетворення лазерних пучків при відображенні від сферичних поверхонь показані на рис. 5.2. Лазерний пучок перетворюється і набуває нових просторові параметри.

Перш за все необхідно визначити фокусну відстань дзеркальної поверхні:

$$\text{- для увігнутої: } f' = r_{сф} / 2; \quad (5.14)$$

$$\text{- для опуклою: } f' = - r_{сф} / 2. \quad (5.15)$$

Параметри вихідного гаусового пучка визначається з співвідношень (5.5) - (5.9), а конфокальний параметр відбитого пучка $2d'_л$ і його розбіжність θ' знаходиться також як при опроміненні прямим гаусовим пучком.

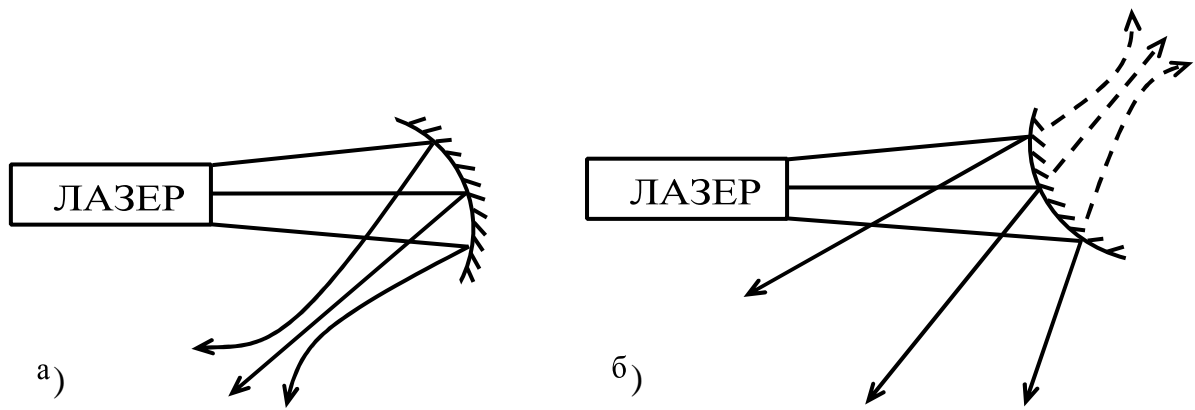


Рис. 1.2. Відображення гауссова пучка лазерного випромінювання від увігнутої (а) і опуклою (б) сферичних дзеркальних поверхонь

При цьому відстань від поверхні, що відбиває до перетяжки перетвореного пучка визначається згідно з формулою:

$$a' = f' - \frac{(f')^2(f' + a)}{(f' + a)^2 + d_e^2} \quad (5.16)$$

Розрахунок рівнів опромінення і ЛОЗ, створюваних гаусовим пучком, відбитим від сферичної поверхні, аналогічний розрахунку для прямого гауссова пучка: при цьому за вихідні дані приймаються параметри відбитого пучка з урахуванням ослаблення потужності при відображенні. У більшості випадків ЛОЗ, створювана відбитим від сферичної поверхні пучком, коротше і ширше, ніж ЛОЗ при прямому опроміненні.

При орієнтовних розрахунках коефіцієнт відображення η лазерного випромінювання від поверхні скляної оптичної деталі приймається рівним 0,96 (тому що втрати на Френелевському відображенні зазвичай приймаються рівними 4%). А точніше значення розраховується зі співвідношення:

$$\eta = (n_{\text{пр}} - 1/n_{\text{пр}} + 1)^2, \quad (5.17)$$

де $n_{\text{пр}}$ - коефіцієнт заломлення матеріалу оптичної деталі для даної довжини хвилі випромінювання лазера.

Радіус перерізу перетвореного пучка з рівномірним розподілом інтенсивності при відображенні від дзеркальної поверхні буде:

$$\text{- від опуклою: } r = (d_0 + \theta l_1)(l_2 + 0,5 r_{\text{сф}}) / r_{\text{сф}} \quad (5.18)$$

$$\text{- від увігнутої поверхні: } r = (d_0 + \theta l_1)(l_2 - 0,5 r_{\text{сф}}) / r_{\text{сф}}. \quad (5.19)$$

де d_0 - діаметр пучка на виході лазера, м; l_1 - відстань від вихідного дзеркала лазера до поверхні, що відбиває, м; l_2 - відстань від поверхні, що відбиває до даної точки, м; $r_{\text{сф}}$ - радіус сферичної поверхні, м. Формула (5.19) може бути застосована для ситуації, коли l_2 більше фокусної відстані сферичної поверхні. При l_2 , близькому до фокусної відстані, слід користуватися наступною формулою для розрахунку радіусу перетину відбитого пучка:

$$r = \theta r_{\text{сф}}/4. \quad (5.20)$$

Розбіжність відбитого пучка буде дорівнює:

$$\theta' = 2 \arctg[(d_0 + \theta l_1) / r_{\text{сф}}]. \quad (5.21)$$

Енергетична освітленість на рогівці або шкірі визначається виразом:

$$E = \frac{P \eta \tau_{a1} \tau_{a2}}{\pi r^2}, \quad (5.22)$$

де τ_{a1} і τ_{a2} - коефіцієнти пропускання середовища на шляху до оптичного елемента і після нього.

5.2 Допустимі рівні лазерного випромінювання на очі і шкіру

Відповідно до СанПіН 5804-91 «Санітарні норми і правила пристрою і експлуатації лазерів» встановлюються гранично допустимі рівні (ПДУ) лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль 180 - 105 нм при різних умовах впливу на очі і шкіру людини. ПДУ лазерного випромінювання визначаються по-різному для різних умов опромінення.

Спочатку розглянемо наступні два випадки:

- одноразова дія, яке відповідає випадковому впливу випромінювання з тривалістю що не перевищує $3 \cdot 10^4$ с. Тоді ПДУ при одноразовому впливі це ті рівні випромінювання, при впливі яких існує незначна ймовірність виникнення оборотних відхилень в організмі працюючого.

- хронічний вплив, що відповідає систематичного повторення впливу, якому піддаються люди, професійно пов'язані з лазерним випромінюванням. ПДУ при хронічному впливі це такі рівні випромінювання, вплив яких при роботі

встановленої тривалості протягом усього трудового стажу не призводить до травми (ушкодження), захворювання або відхилення в стані здоров'я працюючого в процесі роботи або у віддалені терміни життя теперішнього і наступного поколінь.

При визначенні ПДУ лазерного випромінювання розглядають випадки впливу окремого імпульсу і серії імпульсів. Причому в разі серії імпульсів грають роль тривалість окремого імпульсу τ в серії і частота ν проходження імпульсів.

При цьому ПДУ лазерного випромінювання встановлюються для трьох діапазонів довжин хвиль:

- діапазон I: $180 < \lambda \leq 380$ нм;
- діапазон II: $380 < \lambda \leq 1400$ нм,;
- діапазон III $1400 < \lambda \leq 105$ нм.

Також при нормуванні ПДУ лазерного випромінювання можуть грати роль параметри пучка випромінювання:

- колімірованим лазерне випромінювання укладено в обмеженому тілесному куті, в цьому випадку спостерігається прямий пучок або дзеркально відбитий пучок (тобто відбитий під кутом, рівним куту падіння);

- неколімірованое лазерне випромінювання виникає в разі розсіювання або дифузійного відображення. Розсіяне лазерне випромінювання відхиляється на поверхні або всередині середовища таким чином, що змінює просторовий розподіл і розсіюється відразу в різних напрямках (без зміни довжини хвилі випромінювання). І якщо випромінювання відбивається від поверхні, сумірною з довжиною хвилі, і направлено по всіляких напрямках в межах півсфери, то має місце дифузно відбите лазерне випромінювання.

Джерелом випромінювання може бути протяжний об'єкт, це означає, що кутовий розмір джерела лазерного випромінювання більше граничного кута. Така ситуація може виникнути в разі дифузного віддзеркалення лазерного випромінювання. Тоді ПДУ лазерного випромінювання залежать від видимого кутового розміру α цього джерела. Відомий кутовий розмір α джерела випромінювання, радий це величина, яка в загальному випадку визначається з виразу:

$$\alpha = \frac{2}{l} \sqrt{\frac{S_0 \cos \theta}{\pi}}, \quad (5.23)$$

де S_0 - площа джерела, m^2 ; l - відстань від точки спостереження до джерела, м; θ - кут між нормаллю до поверхні джерела і напрямом візування, радий. Граничний кут відповідає такому кутовому розміру джерела, при якому останній може розглядатися як точковий.

Нормованими параметрами лазерного випромінювання є енергетична експозиція H і енергетична освітленість E , усереднені по яка обмежує апертурі. Також нормованими параметрами є також енергія W і потужність P випромінювання, що пройшов через обмежують апертури. Апаратура цей отвір в захисному корпусі лазера або діафрагма, через яку проходить лазерне випромінювання.

При впливі лазерного випромінювання на шкіру в будь-якому діапазоні або на очі в діапазонах I і III визначаються гранично допустимі рівні енергетичної експозиції $H_{пду}$ ($Дж/м^2$) і енергетичної освітленості $E_{пду}$ ($Вт/м^2$), усереднення проводиться по обмежує апертурі діаметром $11,1 \cdot 10^{-3}$ м (площа апертури $S_a = 10^{-6} м^2$). При впливі на очі лазерного випромінювання в діапазоні II першочергово нормуються енергія $W_{пду}$ (Дж) і потужність $P_{пду}$ (Вт) лазерного випромінювання, усереднення проводиться по апертурі діаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м.

Дані енергетичні параметри пов'язані співвідношеннями:

$$H_{пду} = E_{пду} \cdot t; \quad H_{пду} = \frac{W_{пду}}{S_a}; \quad E_{пду} = \frac{P_{пду}}{S_a}. \quad (5.24)$$

Параметри $H_{пду}$, $E_{пду}$ і $W_{пду}$, $P_{пду}$ можуть використовуватися незалежно відповідно до розв'язуваної завданням.

У разі одночасного впливу лазерного випромінювання декількох різних джерел ПДУ для кожного діапазону і умов опромінення встановлюються незалежно.

5.3. Засоби захисту від лазерного випромінювання

Засоби захисту повинні знижувати рівні лазерного випромінювання, що діє на

людину, до величин нижче ПДУ. Засоби захисту від лазерного випромінювання поділяються на колективні та індивідуальні. Вибір засоби захисту в кожному конкретному випадку здійснюється з урахуванням вимог безпеки для даного процесу. Засоби індивідуального захисту від лазерного випромінювання включають в себе засоби захисту очей і обличчя (захисні окуляри, щитки, насадки), засоби захисту рук, спеціальний одяг.

При виборі засобів індивідуального захисту необхідно враховувати: - робочу довжину хвилі випромінювання; - оптичну щільність світлофільтру.

Оптична щільність світлофільтрів, що застосовуються в захисних окулярах, щитках і насадках, для діапазонів лазерного випромінювання I і III повинна задовольняти вимогам:

$$D_{\lambda} \geq \lg \frac{H_{\max}}{H_{\text{пду}}} \quad \text{либо} \quad D_{\lambda} \geq \lg \frac{E_{\max}}{E_{\text{пду}}} \quad (5.25)$$

А для діапазону II:

$$D_{\lambda} \geq \lg \frac{W_{\max}}{W_{\text{пду}}} \quad \text{или} \quad D_{\lambda} \geq \lg \frac{P_{\max}}{P_{\text{пду}}}, \quad (5.26)$$

де H_{\max} , E_{\max} , W_{\max} , P_{\max} - максимальні значення енергетичних параметрів лазерного випромінювання в робочій зоні, $H_{\text{пду}}$, $E_{\text{пду}}$, $W_{\text{пду}}$, $P_{\text{пду}}$ - гранично допустимі рівні енергетичних параметрів при хронічному опроміненні.

ВИСНОВОК

Лазерні доплерівські давачі вібрацій найбільш повно реалізують ідею безконтактних вимірювань. Допплерівське зміщення частоти випромінювання, розсіяного на рухомих частинках або поверхнях, відноситься до числа давно відомих і добре вивчених явищ. Однак до впровадження лазерних джерел випромінювання через спектромет-ричні труднощі можна було вимірювати лише порівняно великі швидкості.

Лазерне випромінювання, володіючи високою монохроматичністю, має і незрівнянно кращі характеристики щодо розходження і інтенсивності пучка, в порівнянні з випромінюванням від інших джерел. Все це дозволяє вимірювати менші поперечні перерізи розсіяння з великим кутовим дозволом. Крім того, висока монохроматичність лазерного випромінювання дозволяє використовувати такі методи обробки світлового сигналу, як гетеродинне детектування і вузькополосну фільтрацію.

Допплерівські давачі мають такі переваги:

визначають можливість отримання високого співвідношення сигнал/шум;
забезпечують частотне і просторове придушення фону зовнішнього засвічення без застосування оптичних фільтрів;

дозволяють вимірювати параметри механічних коливань складної форми на значних відстанях від об'єкта вимірювання;

мають високу перешкодозахищеність;

допускають здійснення аналізу вихідного сигналу фотоприймача в частотному діапазоні, що перевищує область низькочастотних шумів фотоприймача і лазера.

Основні проблеми застосування доплерівських давачів, полягають в наявності вимог до світлопровідного середовища між лазером і поверхнею вимірюваного об'єкта, а також до відбивної здатності поверхні об'єкта. Основними стримуючими факторами на шляху широкого застосування доплерівських

давачів є досить глибокі фізико-математичні основи методу, а також складність і висока ціна приладового забезпечення .

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. Балуев. — 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. — Тои 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.