

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

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____ С.В. Павлова

“ _____ ” _____ 2022 р

ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Лазерний вимірювач вібрації на літаку»

Виконавець: Книш Віталій Віталійович

Керівник: Землянський Володимир Михайлович

Нормоконтролер: Левківський Василь Васильович

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С.В. Павлова

«___» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Книш Віталій Віталійович

1. Тема роботи: «Лазерний вимірювач вібрації на літаку», затверджена наказом ректора від «04» квітня 2022р. № 352/ст.

2. Термін виконання роботи: з 16 травня 2022 р. по 19 червня 2022 р.

3. Вихідні дані роботи: Розробити лазерний віброметр для вимірювання параметрів вібрації та віброшвидкості із відносною похибкою вимірювання.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

1. Методи вимірювання вібрації.

2. Вібродіагностика ГТД.

3. Схема лазерного вимірювача параметрів вібрації

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: таблиці, рисунки, графіки.

6. Календарний план-графік

| № пп | Етапи виконання роботи | Термін виконання етапів | Відмітка про виконання |
|------|--|-------------------------|------------------------|
| 1 | Підбір літератури | 16-22.05.2022 | |
| 2 | Підготовка та написання розділу 1 | 23-27.05.2022 | |
| 3 | Підготовка та написання розділу 2 | 28-31.06.2022 | |
| 4 | Підготовка та написання розділу 3 | 01-05.06.2022 | |
| 5 | Підготовка та написання розділу 4 | 06-11.02.2022 | |
| 6 | Перевірка на плагіат, оформлення та отримання рецензії | 11-14.06.2022 | |
| 7 | Підготовка презентації та доповіді | 15-19.06.2022 | |

8. Дата видачі завдання «16» травня 2022 р.

Керівник дипломної роботи

Землянський В.М.

Завдання прийняла до виконання

Книш В.В.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Лазерний вимірювач вібрації»

на літаку»: 69с., __ рис., 12 табл., 13 літературних джерела.

Об'єкт дослідження: Процес вимірювання вібрації лазером на літаку.

Предмет дослідження: Лазерний вимірювач вібрації на літаку.

Мета роботи: Дослідити явище вібрації, та методи контролю данного параметру.

Методи дослідження: використовувались методи теорії рішень, теорії надійності, теорії ймовірностей, теорії статистики, теорії інформації.

Вібрація, Лазерні вимірювачі, ГТД, Математична модель, Доплерівський ефект

ЗМІСТ

Вступ

1. Методи вимірювання вібрації

- 1.1 Класифікація вібрації як явища
- 1.2 Класифікація вібраційних перетворювачів
- 1.3 Інерційні методи вимірювання вібрації
- 1.4 Магнітоіндукційні перетворювачі
- 1.5 П'єзоелектричні перетворювачі

2. Вібродіагностика ГТД

- 2.1 Поняття про вібрації двигуна
- 2.2 Математичні моделі вібрації
- 2.3 Квазідетермінована вібрація
- 2.4 Квазігармонічна вібрація
- 2.5 Амплитудно-модульована вібрація
- 2.6 Загальні вимоги до вимірювальної системи вібрації

3. Схема лазерного вимірювача параметрів вібрації

- 3.1 Лазер
- 3.2 Принцип дії лазера
- 3.3 Активна речовина лазера
- 3.4 Резонатори
- 3.5 Оптичні датчики
- 3.6 Фотодіоди
- 3.7 Конвертер світло-напруга
- 3.8 Частотний детектор
- 3.9 Інтегратор ЦАП з USB інтерфейсом
- 3.10 Основні положення, що враховуються при конструюванні
- 3.11 Програмні аналізатори спектра

Висновок

Список використаної літератури

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АТ - авіаційна техніка

БП - безпека польотів

ЗПС – злітно-посадкова смуга

НДДКР - науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи

ІТС - інженерно-технічний склад

ЛФ – людський фактор

ПП – професійна підготовка

ПС - повітряне судно

ТО - технічне обслуговування

ТОіР - технічне обслуговування і ремонт

ДПВ - доплеровський віброметр

АЛВВ - авіаційний лазерний вимірювач вібрації

ВСТУП

Актуальність теми.

Для забезпечення безпеки польотів, виявлення дефектів на ранніх стадіях їх виникнення, своєчасного вжиття заходів щодо запобігання поломкам обладнання та авіаційних катастроф, необхідно знати причини деяких дефектів, точно і достовірно вимірювати значення фізичних величин, які визначають стан літака.

Вібрація, що виникає під час роботи авіаційних двигунів і пристроїв в цілому, має значний вплив на технічний стан авіаційного обладнання, двигунів і літальних апаратів. Вібрація збільшує навантаження на опори, деталі та вузли, на кріплення літального апарату, що призводить до підвищеного зносу, зниження міцності та надійності, скорочення ресурсу пристроїв і двигуна, руйнування елементів конструкції двигуна чилітака.

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

Мета роботи: Дослідити явище вібрації, та методи контролю данного параметру.

Об'єкт дослідження: Процес вимірювання вібрації лазером на літаку.

Предмет дослідження: Лазерний вимірювач вібрації на літаку.

Методи дослідження: використовувались методи теорії рішень, теорії надійності, теорії ймовірностей, теорії статистики, теорії інформації.

Вібрація, Лазерні вимірювачі, ГТД, Математична модель, Доплерівський ефект

РОЗДІЛ 1

ВІБРАЦІЯ ЯК ЯВИЩЕ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІ

1.1 Класифікація вібрації як явища

Вибрація – механічна вібрація. Вібрація – це механічне коливання машин і механізмів, які характеризуються такими параметрами, як частота, амплітуда, вібраційна ШВИДКІСТЬ, віброприскорення. Вібрація утворюють не рівноважені СИЛИ, які виникають під час роботи машин тощо. Говорячи простою мовою, вібрація - це коливання твердих тіл.

Про вібрації також говорять у вузькому сенсі, тобто механічні вібрації, які мають помітний вплив на людину. У даному випадку мається на увазі діапазон частот 1,6-1000 Гц.

Поняття вібрації тісно пов'язане з поняттям шуму, інфразвуку, звуку.

Залежні від джерела події розрізняють такі типи вібрацій:

локальна вібрація, яка передається людині від ручного механізованого (від двигуна) інструменту;

локальна вібрація, що передається людині від ручного немеханізованого інструменту;

загальна вібрація 1 категорії - транспортна вібрація, яка впливає на людину на робочому місці ТРАНСПОРТНИХ СРЕД, що рухається по землі, дорогах тощо. Приклад: авіаційні вантажівки.

загальна вібрація 2-го розряду - транспортно-технологічна вібрація, яка діє на людину на робочому місці машин, що рухаються по спеціально підготовленій поверхні виробничих приміщень тощо. Приклад: крани, підлогові виробничі машини;

загальна вібрація 3 категорії - це технологічна вібрація, яка діє на людину на робочому місці стаціонарних машин або передається на робочі місця, які НЕ мають джерел вібрації. Приклад: верстати, ливарні цехи.

загальна вібрація в житлових і громадських будівлях від зовнішніх джерел. Приклад: вібрація від проїжджаючого трамвая.

загальна вібрація в житлових і громадських будівлях від внутрішніх джерел. Приклад: ліфти, холодильники. В авіаційній промисловості вібрація реактивного двигуна є щоденною проблемою. Екіпажі з технічного обслуговування, ремонту та капітального ремонту (MRO) у всьому світі повинні стежити за вібрацією двигуна, щоб забезпечити безпеку польотів та ефективне технічне обслуговування. Сила вібрації літака залежить від її рівня. Промисловим стандартом для авіаційних коливань є шкала від 0 до 1,2 дюйма в секунду (IPS). 0-2 IPS вважається хорошим і зазвичай очікується від усіх типів літаків, коли все працює належним чином. 2-4 IPS є прийнятним, але його також можна виправити за допомогою планового технічного обслуговування. 4-6 IPS трохи грубий і зазвичай виникає в екстремальних погодних умовах або турбулентності на трасі. Однак вібрації літака 1.0-1.2 IPS дуже сильні і небезпечні. Це може викликати серйозні проблеми, якщо ви не здійснили аварійну посадку.

Повна вібрація газотурбінного двигуна є сумою внесків різних рухомих частин всередині двигуна. Щоб порівняти величину вібрації з конкретними компонентами двигуна, інженери з обслуговування покладаються на аналіз вібрації та інструменти для балансування обрізки. Вібрації авіаційного газотурбінного двигуна можуть бути викликані рядом причин, основними з яких є:

- джерела вібрації з частотою обертання ротора:
- дисбаланс ротора;
- зсув послідовно з'єднаних роторів;
- кінцеві підшипники, підшипники тощо;
- джерела вібрації з частотою, відмінною від частоти обертання ротора:
- нерівномірний потік повітря на вході в двигун;
- неправильне центрування роторів та їх з'єднувальних шлицевих з'єднань;
- зачеплення ротора статора;
- нерівномірне перемикання передач тощо.

1.2 Класифікація вібраційних перетворювачів

У віброметрії використовуються два принципи вимірювання: динамічний і кінематичний. Динамічний принцип вимірювання реалізований в інерціальних датчиках.

Вимірюються абсолютні значення параметрів вібрації досліджуваних об'єктів.

У безконтактних датчиках використовується кінематичний принцип вимірювання. При цьому вимірюється зміна в часі координат точок досліджуваних об'єктів відносно вібруючої нерухомої системи координат. Класифікація абсолютних вібраційних датчиків за фізичними принципами трансформації (рис. 1.1). Класифікація датчиків відносно вібрації за фізичними принципами трансформації (рис. 1.2)

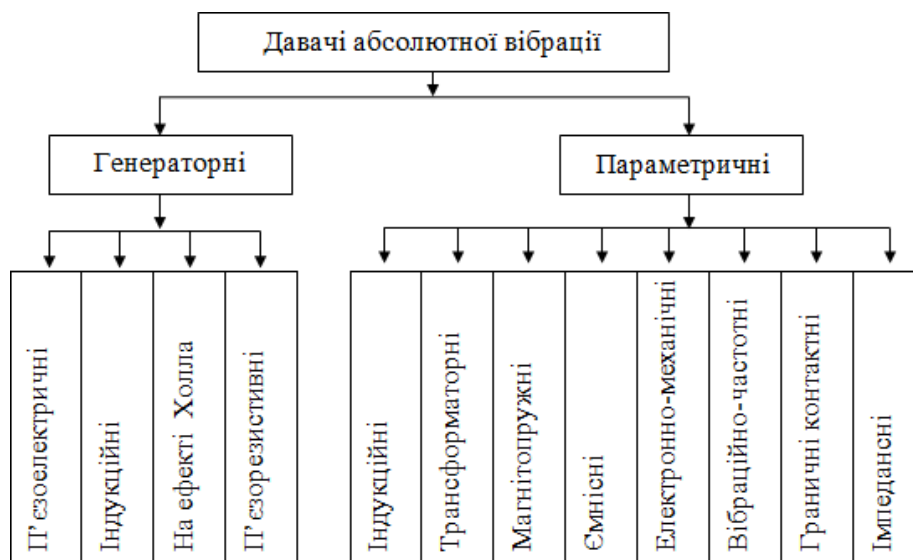


Рисунок 1.1 Класифікація датчиків абсолютної вібрації по використуванню для перетворення фізичним принципом.

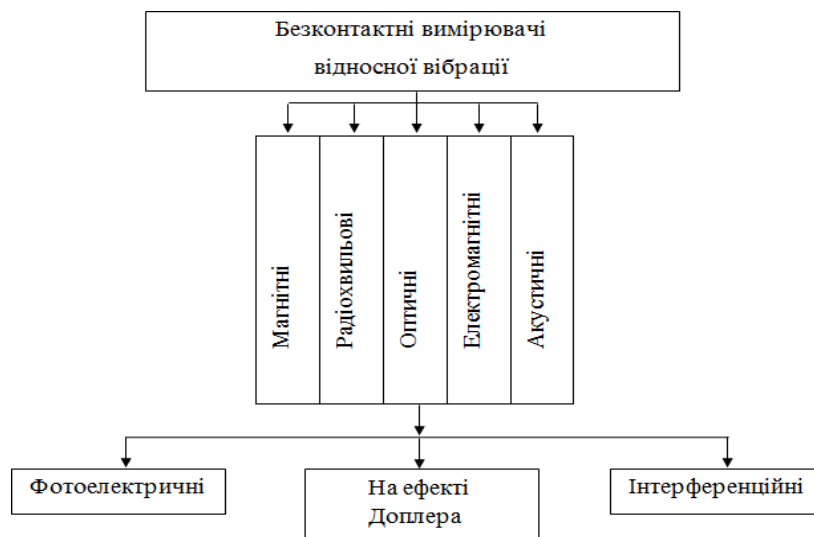


Рисунок 1.2 Класифікація давачів відносно вібрації відповідно до використовуваних для перетворення фізичних принципів.

З рис. 1.1 видно, що перетворювачі абсолютної вібрації в електричний сигнал поділяються на два класи: генератор, що перетворює енергію механічних коливань в електричну; параметричний, який перетворює механічні коливання в вимірювання параметрів електричного кола, таких як індуктивність, ємність, опір, частота або фазовий зсув тощо.

З абсолютних датчиків вібрації найпоширенішими є п'єзоелектричні датчики. Вони мають невеликі розміри, широкий частотний і динамічний діапазони, низькі коефіцієнти впливу зовнішніх факторів: магнітного та електричного полів, звукового тиску, деформації досліджуваного об'єкта.

Принцип дії п'єзоелектричних датчиків заснований на використанні прямого п'єзоелектричного ефекту, який полягає в тому, що під дією зовнішніх сил, у тому числі чергування, деякі кристали або п'єзокераміка утворюють електричні заряди. Найпоширенішими п'єзоелектричними матеріалами є кварц, турмалін, ніобат літію, титанат свинцю, цирконат, титанат вісмуту, оксид цинку тощо.

Одним з основних факторів, що обмежують використання п'єзоелектричних датчиків, є температура, при якій вони працюють. При перевищенні певної межі температури п'єзоелемент втрачає частину поляризації і коефіцієнт перетворення датчика зменшується. Коли точка Кюрі п'єзоелектричного матеріалу досягається, поляризація повністю зникає, і датчик виходить з ладу. У діапазоні низьких температур обмеження на використання п'єзоелектричних датчиків визначаються можливістю розтріскування п'єзоелектричного матеріалу. Майте на увазі, що датчик повинен надавати мінімальний вплив на об'єкт, що вібрує. Під впливом маси датчика змінюється резонансна частота об'єкта.

У безконтактних лічильниках у вібродіагностиці найбільше використовуються оптичні методи та засоби вимірювання параметрів вібрації, які поділяються на амплітудні та частотні. Методи вимірювання амплітуди включають фотоелектричні (або фотомодуляційні) та інтерференційні методи вимірювання.

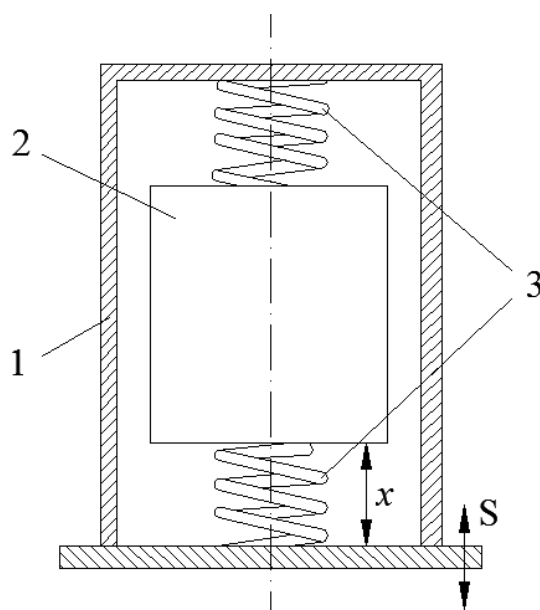
Параметри вібрації на основі зміни частоти відбитого від об'єкта випромінювання вимірюють за допомогою Доплерівських вимірювальних приладів.

1.3 Інерціальні методи вимірювання вібрації

Вібрацію об'єкта можна визначити, спостерігаючи за його положенням відносно інших об'єктів, які вважаються нерухомими. Розрізняють абсолютний та інерційний методи вимірювання вібрації залежно від об'єкта, для якого проводяться вимірювання.

При вимірюванні вібрації абсолютним методом вібрація спостерігається відносно світового простору (зірок). В авіації цей метод дуже важко застосувати, оскільки рух літака відносно світу у багато разів перевищує вібрацію.

Широке застосування знайшов інерційний метод вимірювання вібрації



авіаційних двигунів. Цей метод заснований на першому законі Ньютона — властивості тіла зберігати стан спокою, коли на нього не діють сили.

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

Спосіб вимірювання (рис. 1.3) складається з корпусу 1 (вібраційного елемента), жорстко з'єданого з двигуном літака, та інерційної маси 2 (невібраційного елемента), з'єднаної з корпусом 1 пружинами 3. Таким чином,

коли двигун вібрає, корпус 1 ВВП буде рухатися, а інерційна маса 2 за рахунок своєї інерції залишиться відносно нерухомою. Отже, ВВП перетворює вхідний сигнал - коливальний рух S корпусу 1 (і, отже, авіаційного двигуна) відносно простору, вихідний сигнал - переміщення x ВВП корпусу відносно інерційної маси 2 (сейсмічної маси). Рух такої коливальної системи описується виразом

$$\beta = \frac{\delta}{2\sqrt{cm}}$$

Де – відносний коефіцієнт загасання; δ - коефіцієнт демпфірування, кг/с;
 власна кругова частота, 1/с; C — жорсткість пружин, Н/м; m — маса невібруючого елемента, кг.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

Коефіцієнт передачі такої системи описується виразом:

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

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

На рис 1.4 показана АЧХ ВВП з різним коефіцієнтом загасання

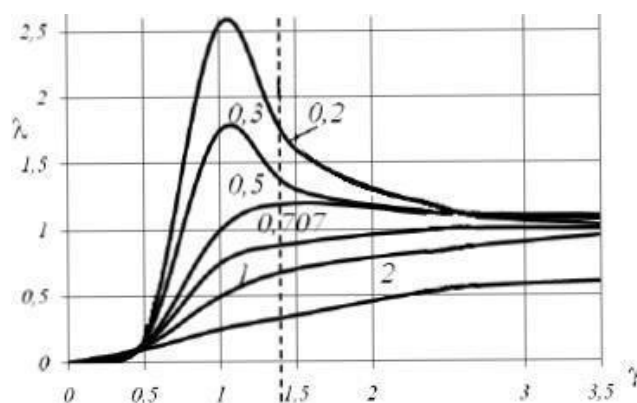


Рисунок 1.4 — АЧХ ВВП з різним коефіцієнтом загасання

З АЧХ ВВП видно, що при $\gamma \gg 1$ модуль ВВП наближається до одиниці. Отже, при $\gamma \gg 1$ переміщення тіла ВВП відносно невібруючого елемента буде

дорівнювативібропереміщенню. Тому передбачається, що при $\gamma > 1,5$ розглянута ВВП працює в режиміперетвореннявіброзміщення, при $\gamma < 0,5$ – перетвореннявіброприскорення, а при $0,5 < \gamma < 1,5$ – перетвореннявіброшвидкості. Для забезпечення $\gamma > 1,5$ необхідновикористовуватипружинималоїжорсткості, а для $\gamma < 0,5$ - високоїжорсткості. Зробити ВВП з $0,5 < \gamma < 1,5$ доситьважко, тому зазвичайстворюють ВВП з $\gamma < 0,5$ або $\gamma > 1,5$.

Для отриманнядистанційнихвіброметрівнеобхідноперетворити рух тіла ВВП відносноневібруючогоелемента в електричний сигнал. Для цьоговикористовуютьсямагнітоіндукційні (МІП) і п'єзоелектричні (ПЕП) перетворювачі.

1.4 Магнітоіндукційніперетворювачі

Перше повномасштабнезастосуванняотрималивібраційні датчики МІП (рис. 1.6).

Його структурна схема показана на рис. 1.5.

У таких датчиках невібраційнийелемент 2 являє собою циліндричнийпостійниймагніт, намагніченийвздовжтворюючої, а індукційнакатушка 3 жорсткоз'єднана з корпусом. Таким чином, тіло і магнітутворюють ВВП, а магніт і катушка - МІП, на виходіякоговиникаєвібрація ЕРС (E). Розглянемобільш детально вібраційний датчик з МІП.

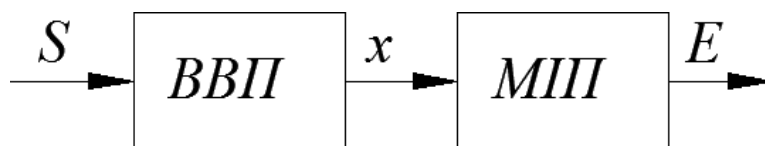


Рисунок 1.5 — Структурна схема давчавібрації з МІП

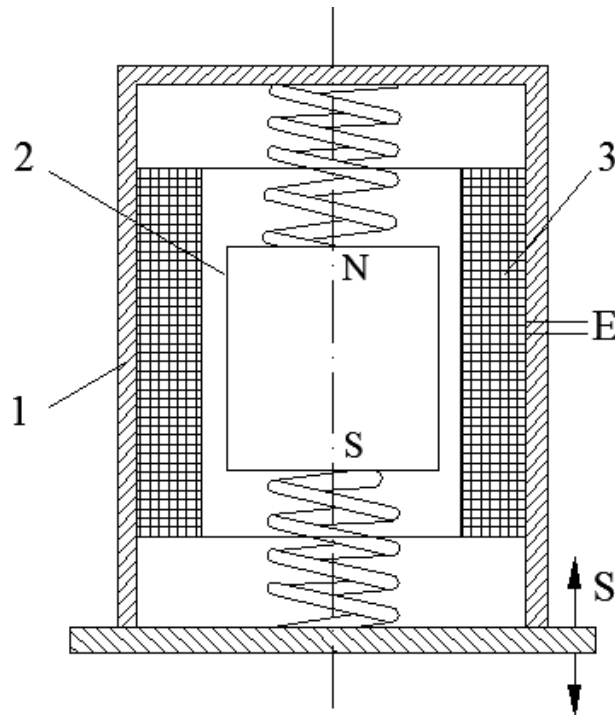


Рисунок 1.6 Конструкція давача вібрації з МП

МП є диференціальним перетворювачем, і ЕРС на його виході залежить від швидкості взаємного переміщення корпусу датчика з котушкою 3 відносно невібраційного постійного магніту 2, тому ці датчики утворюють ВП з $\gamma > 1,5$, тобто при $x = S$. У 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

Тому для отримання інформації про віброшвидкість у віброметрах з МП необхідно виміряти ЕРС змінного струму. ЕРС на виході МП має невелике значення, тому потребує посилення. Однак, коли ЕРС передається від МП на вхід підсилювача, на дріт впливають електромагнітні та електростатичні поля, які викликають інші ЕРС в проводах, так звані наведення, які мають частоти, відмінні від частот вібрації. При цьому вібрація двигуна може виникати на різних частотах. Отже, для посилення ЕРС лише необхідної частоти (першої обертової гармоніки), підсилювачі віброметрів швидкості з МП повинні мати постійний коефіцієнт передачі (підсилення) у всьому діапазоні частот ЕРС (від f_m до f_m). АЧХ такого підсилювача

(залежність коефіцієнта підсилення від частоти сигналу підсилювача) повинна бути схожою на показану на рис. 1.7.

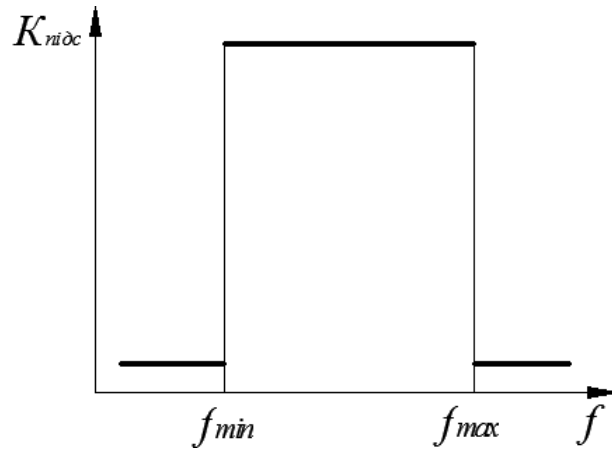


Рисунок 1.7 Ідеальний вигляд АЧХ підсилювача віброметра швидкості

Щоб отримати бажану АЧХ підсилювача віброметра швидкості, блок-схема якого наведена на рис. 1.8, після вхідного каскаду підсилення ВК, узгодження високого вихідного опору МПП з низьким вхідним опором наступних каскадів, включають послідовно інтегруючу та диференційовану RC-ланцюг, а потім дві виборчих каскади посилення. Інтегрування ІЛ та диференціювання ДЛ ланцюгів забезпечують ослаблення на частотах, відповідно $f > f_m$ та $f < f_m$.

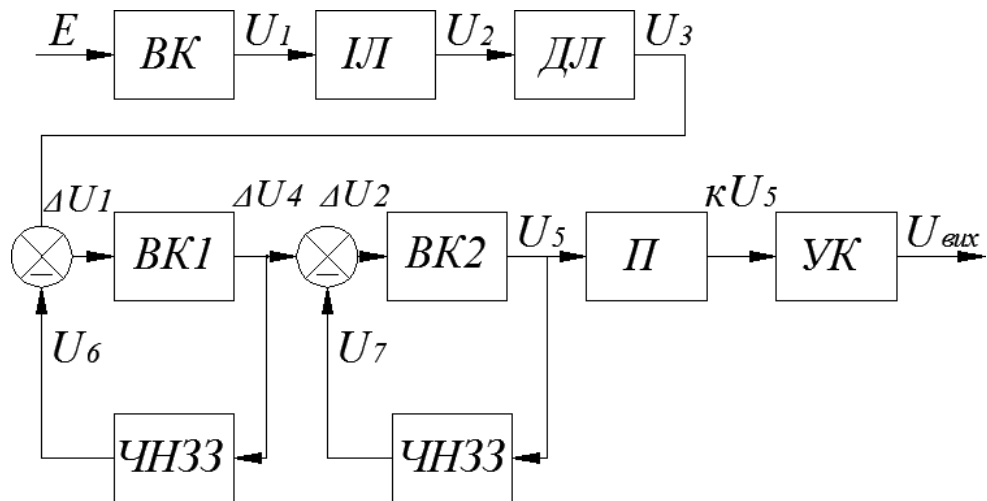


Рисунок 1.8 — Структурна схема підсилювача віброметра швидкості

Перший виборчий етап $BK1$ за рахунок частотно-залежного негативного зворотного зв'язку ЧНЗЗ має АЧХ, показану на рис. 1.9 крива 2. Вона підсилює ЕРС з частотами вище f_m . Другий виборчий етап $BK2$ має АЧХ, показану кривою 1.

Цей етап підсилює ЕРС з частотами нижче f_m . В результаті такого включення RC-схем і селективних підсилювачів частотна характеристика підсилювача (крива 3) близька до ідеальної (рис. 1.7).

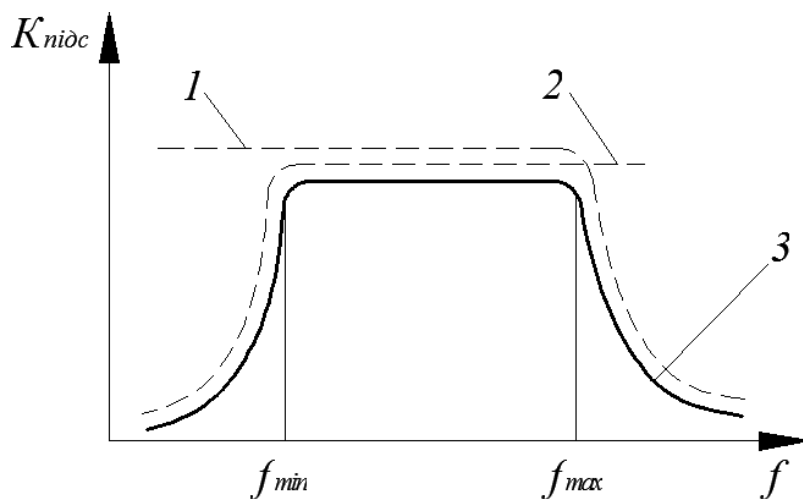


Рисунок 1.9—Дійсна АЧХ підсилювача швидкості

Для отримання необхідного значення коефіцієнта підсилювача після другого виборчого підсилювача підсилюють не виборний каскад підсилення П (рис. 1.8). Вихід цього каскаду підключений до входу узгоджувального каскаду УК, що відповідає високому вихідному опору підсилювача при низькому вхідному опорі наступних пристроїв. Віброміри з МІР використовуються на всіх літаках з турбореактивними або турбореактивними двигунами.

На літаках з ТВД, у яких швидкість обертання карданного валу постійна, умова $a = V = s$, тобто прискорення вібрації прямо пропорційне.

Однак прискорювач віброметра для ТВД повинен підсилювати ЕРС лише на одній частоті f і може мати коефіцієнт посилення, відмінний від посилення віброметра швидкості. Враховуючи, що майже в ТВД швидкість може змінюватися незначно і що неможливо створити кілька ТВД з точно однаковою швидкістю карданного валу, вібраційний підсилювач з МІР-прискоренням повинен мати смугу частот, але дуже вузьку: 5-10 Гц.

Для отримання потрібної форми АЧХ прискорювача віброметра прискорення на вході підсилювача встановлюють подвійний Т-подібний RC-фільтр, який є частиною схеми негативного зворотного зв'язку підсилювача П і збігу УФ каскадів (рис. 1.10), який встановлюється так, щоб частота не мала негативного зв'язку, а

посилення було максимальним.

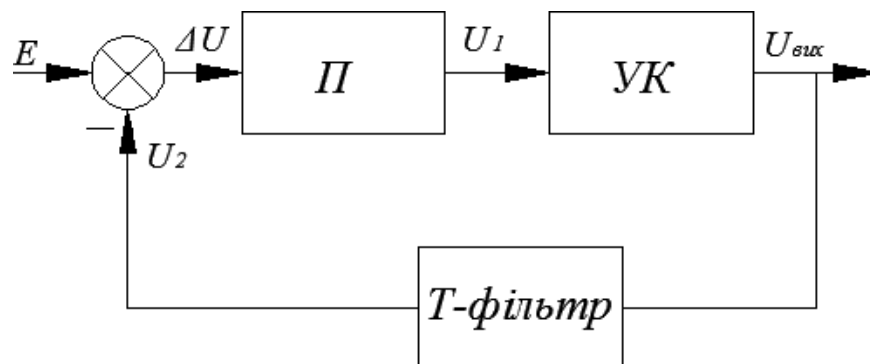


Рисунок 1.10 — Схема включення Т-фільтра

АЧХ підсилювача прискорювального віброметра з МІР наведено на рис. 1.11. Для отримання інформації про віброзміщення інтегрують сигнал з виходу підсилювача віброметра швидкості.

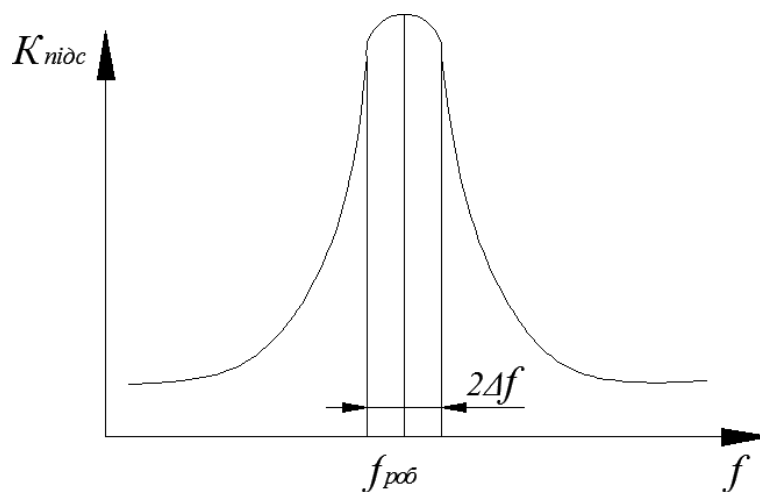
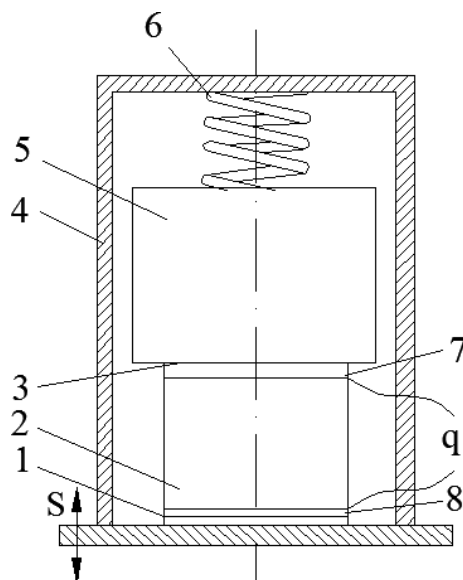


Рисунок 1.11 — АЧХ підсилювача віброметра прискорення з МІП

1.5 П'єзоелектричні перетворювачі

У вібраційних датчиках ПЕП використовується п'єзоефект (рис. 1.12),



тобто властивість деяких кристалів утворювати на своїй поверхні електричні заряди під час механічних деформацій.

Рисунок 1.12 — Давач вібрації з ПЕП

У такому датчику ПЕП через ізолятор 1 жорстко прикріплений до корпусу 4 датчика, невіброуючий елемент 5 також з'єднаний з ПЕП через ізолятор 3. Коли датчик вібрає за рахунок інерції невіброуючого елемента, виникає сила F , що викликає деформацію ПЕП, а електроди 7, 8 утворюють електричний заряд, який визначається співвідношенням

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

де d_{11} – постійний коефіцієнт для даного кристала, який називається п'єзоелектричним модулем, Кл/Н; F — сила, яка викликає деформацію, Н.

Сила F , що викликає деформацію п'єзоелемента, залежить від маси невіброуючого елемента 5 (рис. 1.12) і прискорення, що впливає на п'єзоелемент. Тому вібраційний датчик з ВВП ВВП повинен мати власну частоту, значно вищу частоти вібрації.

РОЗДІЛ 2

ВІБРОДІАГНОСТИКА ГТД

1.1 Поняття про вібрації двигуна

Газотурбінні двигуни (ГТД) широко використовуються в різних галузях промисловості: авіації, енергетиці, суднобудуванні, транспорті. У зв'язку з цим важливівісі техніко-економічні характеристики, що визначають якість роботи двигуна. Особливі вимоги пред'являються до надійності та ресурсу як основних факторів підвищення економічної ефективності газотурбінних двигунів.

Надійність і термін служби багато в чому визначаються рівнем вібраційної напруги двигунів.

Прагнення до підвищення продуктивності двигуна призводить до збільшення швидкості, збільшення енергії, ускладнення робочих процесів і конструктивних схем двигунів (багатоступінчасті компресори, двоконтурні схеми, форсажні камери) до використання легких і тонкостінних елементів конструкції. У результаті ускладнюється характер вібрації, збільшуються вібраційні навантаження на деталі двигуна, тобто зростає інтенсивність і небезпека вібрації.

Контроль вібрації стає невід'ємною частиною забезпечення високої якості двигунів. Здійснюється на етапах проектування, переробки, серійного виробництва та експлуатації двигунів. Контроль вібрації вимагає вмілого поєднання обчислювальних і експериментальних методів. Складність вібраційних явищ в ВМД визначає домінуюче положення експерименту. Постановка вібраційного експерименту та оцінка його результатів є складним дослідницьким завданням.

Обсяг виміральної інформації різко збільшується.

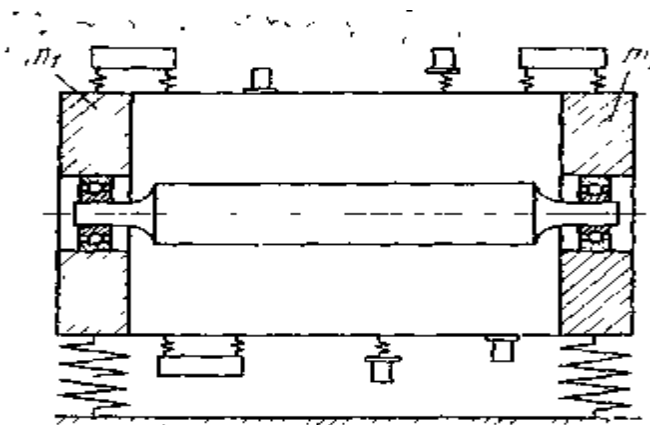
Донедавна вимірювання вібрації газотурбінного двигуна носили спорадичний і переважно пізнавальний характер. В даний час характерною особливістю віброметрії є багатодосліджень. Ще однією характерною особливістю є розробка функцій для швидкої оцінки загального вібраційного стану двигуна. Віброконтроль силових корпусів перетворюється на технологічну операцію, яка виконується безперервно під час усіх видів випробувань і роботи двигуна. Збільшується кількість керованих компонентів двигуна, ускладнюються алгоритми обробки виміральної інформації. Вібрація двигуна є реакцією на дію надзвичайних сил. Зазвичай на двигуноодночасно діють кілька різних сил. Величина і характер реакції двигуна залежить від збуджуючих сил (їх кількості, величини, характеру, розташування і способу застосування) і властивостей двигуна як коливальної системи.

Припустимо, що двигун можна уявити у вигляді повністю жорсткого корпусу, встановленого на амортизаторах і збудженого силою. Така коливальна система має шість ступенів свободи і може здійснювати лінійні та кутові (обертальні) коливання. При відповідному виборі системи координат її рух описується трьома лінійними і трьома кутовими або шістьма лінійними координатами. Вібрацію такого двигуна можна виміряти шістьма однокомпонентними датчиками, кожен з яких вимірює вібрацію на одній з осей координат. Розглядаючи двигун як лінійну систему, цю схему вимірювання можна поширити на вплив сил довільного типу та дії кількох довільних сил. Вибрація такого двигуна вивчення його коливань неможливою аналітичним, ні експериментальним шляхом. В останньому випадку двигун довелося б встановити на нескінченно велику кількість датчиків, що дорівнює числу його ступенів свободи.

Практично спробуйте отримати приблизне рішення цієї проблеми. Двигун представлений у вигляді ідеалізованої коливальної системи з мінімальною кількістю ступенів свободи, але при збереженні основних коливальних властивостей реального двигуна. Деякі компоненти двигуна подають у вигляді мас, нехтуючи їх пружними властивостями, інші враховують лише пружність, нехтуючи масами. Наприклад, на рис. 1 двоопорний двигун зображений у вигляді силового тіла, що складається з двох основних мас і жорстко з'єднаних між собою невагомими елементами. Неенергетичні елементи (агрегати, прилади) представлені у вигляді маси, пружно або жорстко з'єднаної з силовим тілом. За цією схемою вібрація силового тіла збуджується жорстким нерівноваженим ротором, а вібрація несилового елемента — вібрацією корпусу в місцях їх кріплення. Передбачається, що об'єкт не робить істотного впливу на коливання двигуна, а несилкові елементи на коливання силового тіла (через відносну малість їх мас).

Згідно з цими пропозиціями, вібрація силового корпусу характеризує загальний вібраційний стан двигуна - це ступінь дисбалансу ротора і ступінь збудження вібрації несилкових елементів. Він також дає оцінку сумарної енергії

вібрації двигуна та ступеня залежності двигуна від об'єкта. Оскільки кінетична енергія прямо пропорційна масі і квадрату вібраційної швидкості, загальна енергія коливань зосереджена в основному в основних масах двигуна, а вібрація силового тіла є його визначальною характеристикою. Відповідно, вібрацію силового корпусу можна назвати сумарною вібрацією двигуна. Повна вібрація часто означає лише лінійну вібрацію, оскільки кутові коливання не характерні для ГТД.



Найпростіша схема двигуна як коливальної системи

При вивченні вібрації використовуються різні схеми двигуна. Найпростіша схема більш-менш задовільна лише при малих коливаннях (десятки Гц), де ще можна вважати корпус і ротор двигуна жорсткими. На середніх частотах (сотні Гц) гнучкістю корпусу і ротора, як правило, нехтувати не можна і вимагає більш складної конструкції схеми коливань. На високих частотах (тисячі Гц) складно зробити задовільну схему. Зі збільшенням частоти вібрації ускладнюється також вибір стандартних точок, а також інтерпретація результатів вимірювань.

Вібрацію, як правило, класифікують за своєю природою, за фізичною природою її явищ. Таким чином, виникають коливання механічного, аеродинамічного та гідродинамічного, акустичного походження тощо. Найпоширеніша класифікація вібрацій за конструктивними компонентами двигуна, що збуджують цей вид вібрації. Розрізняють «поворотні», «кручені», «лопаті», «зуби», «підшипники» та вібраційні. Порядок гармонік вібрації визначається по відношенню частоти вібрації до числа обертів джерела:

$$k = \frac{f}{n_c}, (1)$$

а не до частоти нижньої частотної складової, як це прийнято в гармонійному аналізі. Таким чином, існують «іменовані» гармоніки: 1-я гармоніка ротора, 4-та гармоніка гвинта і т. д. Термін «гармоніка» означає, що ця частотна складова вібрації належить до певного джерела і не передбачає суворої гармонії.

Так, коливання зі змінною амплітудою з дискретною частотою, що дорівнює чотирикратній швидкості обертання гвинта, називають 4-ю гармонікою пропелера.

Вібрація як процес, що відбувається в часі, описується відповідним законом коливань і характеризується певними параметрами цього закону. Гармонійна вібрація описується трьома незалежними параметрами: амплітудою, частотою та початковою фазою. Частота вібрації вимірюється в Гц, а відповідний період коливань і кутова частота вимірюються в с і рад/с відповідно. Фаза вимірюється в радіанах або кутових градусах (1рад = 57,295 °).

Одиниці амплітуди вібрації залежать від виміряного значення вібрації. Вібраційні переміщення вимірюються в м, швидкість в м/с, прискорення в м/с². Поширена практична система одиниць: переміщення вимірюються в міліметрах, швидкості в мм/с, прискорення в одиницях нормованого прискорення тяжіння (1g = 9,807 м/с²).

Зв'язок між амплітудами прискорення в практичних і міжнародних системах виражається формулою:

$$J[g] = \frac{W}{9,807}. (2)$$

Іноді використовується безрозмірний коефіцієнт, який дорівнює відношенню прискорення вібрації до прискорення сили тяжіння:

$$k = \frac{W}{g}. (3)$$

Цей параметр називається коефіцієнтом вібраційного перевантаження. Чисельно воно збігається зі значенням прискорення, вираженим у.

Пікове значення вібрації визначається як найбільше відхилення значення вібрації в ту чи іншу сторону від нуля:

$$x_{\text{пик}} = |x_{\text{max}}| \quad (4)$$

Пікове значення переміщень характеризує максимальне відхилення тіла, що коливається, що важливо, наприклад, при виборі значень зазорів між тілами, що коливаються. Пікове значення прискорень використовується для оцінки найбільших сил інерції. Ефективне або ефективне значення вібрації

$$x_{\partial} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt} \quad (5)$$

має певний фізичний сенс у випадках вібраційної швидкості, оскільки енергія вібрації зазвичай пропорційна квадрату швидкості вібрації.

Середнє значення вібрації визначається як середнє арифметичне миттєвих значень (без урахування знака; середнє значення з урахуванням знака за весь період дорівнює нулю):

$$x_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |x(t)| dt \quad (6)$$

Використовується для оцінки загальної інтенсивності вібрації.

Відношення ефективного значення до середнього називається формфактором:

$$k_{\phi} = \frac{x_{\partial}}{x_{\text{cp}}} \quad (7)$$

а пік до ефективного значення - амплітуда коефіцієнта або коефіцієнт гребеня:

$$k_a = \frac{x_{\text{пик}}}{x_{\partial}} \quad (8)$$

У випадках гармонійних вібрацій

$$\begin{aligned}
x_{\text{нук}} &= A; \\
x_{\partial} &= \frac{A}{\sqrt{2}} = 0,707 A; \\
x_{\text{ср}} &= \frac{2}{\pi} A = 0,637 A; \\
k_{\phi} &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11; \\
k_a &= \sqrt{2} = 1,41. \quad (9)
\end{aligned}$$

Іноді використовуються відносні одиниці вібрації. Рівень інтенсивності вібрації в децибелах визначається як двадцятикратний десятковий логарифм відношення абсолютного значення швидкості вібрації до певного початкового рівня:

$$L = 20 \lg \frac{V}{V_0} \text{ дБ} \quad (10)$$

За початковий рівень інтенсивності вібрації приймається ефективне значення вібраційної швидкості. Вимірним параметром шуму є звуковий тиск.

1.2 Математичні моделі вібрації

При розв'язуванні вібраційних задач використовуються різні математичні моделі реальних коливань.

Більшість моделей основних компонентів вібрації засновані на їх уявленні у вигляді вузькосмугового процесу з повільною амплітудою і фазою, що змінюються з часом.

Широкосмугове вібраційне моделювання засноване на його представленні у вигляді лінійної суперпозиції основних компонентів і вібраційного шуму. Давайте розглянемо деякі можливі моделі вібрації ГТЕ.

1.3 Квазідетермінована вібрація

Така вібрація є виродженим випадковим процесом, реалізація якого описується тимчасовими функціями певного типу, що містять один або кілька випадкових параметрів, що не залежать від часу. Нехай реалізації окремих компонентів вібрації являють собою гармонічну вібрацію з випадковою початковою фазою. Тоді ансамбль реалізацій кожного компонента має вигляд:

$$X(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (11)$$

де A_0 і ω_0 закріплені. Припустимо, фаза рівномірно розподілена по періоду:

$$p(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{при } |\varphi| \leq \pi \\ 0 & \text{при } |\varphi| > \pi \end{cases} \quad (12)$$

Кореляційною функцією вібрації (11) є гармонічна вібрація тієї ж частоти (рис. 4):

$$K(\tau) = \frac{A_0^2}{2} \cos \omega_0 \tau, \quad (13)$$

, а спектральна щільність представлена однією дискретною лінією на частоті ω_0 :

$$G(\omega) = \pi A_0^2 \delta(\omega - \omega_0), \quad (14)$$

де $\delta(\omega)$ дельта-функція Дірака.

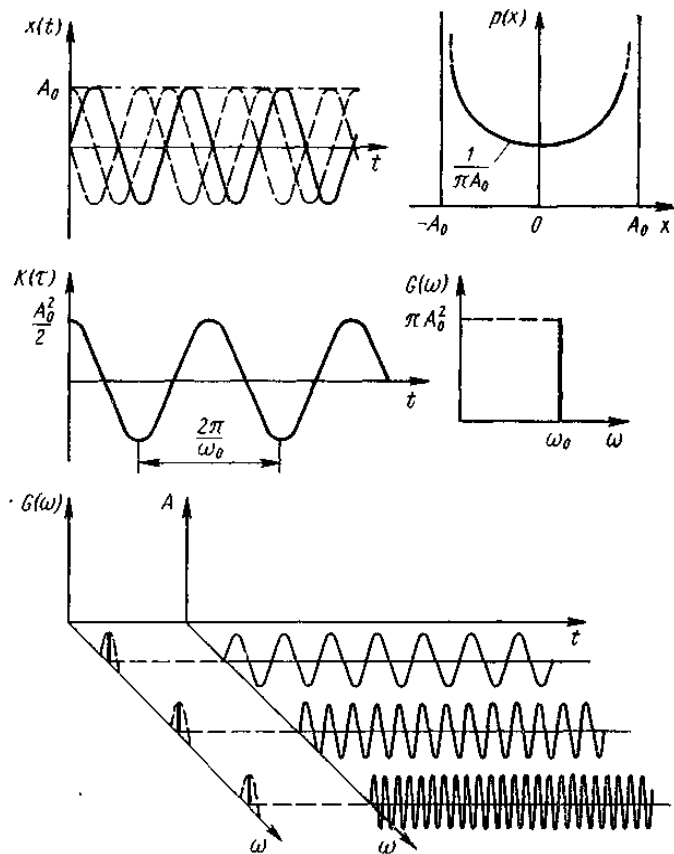


Рис. 4 Характеристика квазідетермінованої вібрації.

Широкосмугова квазідетермінована вібрація може містити декілька гармонійних компонентів (11), тобто є полігармонічним процесом:

$$x_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n A_{0i} \sin[\omega_{0i}t + \varphi_i(t)] \quad , (16)$$

, в якому один або кілька параметрів є випадковими.

Спектрально-часові характеристики такої вібрації наведені в нижній частині рис. 4. Пунктирна лінія на графіку показує частотну характеристику фільтра, що розділяє компоненти, і тип компонентів на виході фільтра. Реалізації квазідетермінованих компонентів вібрації також можуть відрізнятися за частотою або амплітудою. В останньому випадку, наприклад, одновимірність ймовірності має вигляд:

$$p(x) = \int_x^{\infty} \frac{p(A)}{\pi \sqrt{A^2 - x^2}} dA \quad , (17)$$

де $p(A)$ - закон розподілу амплітуд реалізацій.

2.4 .Квазігармонічнавібрація

Окремі складові загальної вібрації являють собою вузькосмугову вібрацію і мають форму модульованої гармонічної вібрації, тому їх називають квазігармонічною. Квазігармонійна вібрація виникає, наприклад, коли широкосмугова випадкова вібрація застосовується до коливальної системи з одним ступенем свободи з іслабким загасанням. Якщо збудливе широкосмугове коливання є нерухомим і нормальним, то квазігармонійне коливання динамічної системи також буде нерухомим і нормальним.

Спектральна щільність квазігармонічної вібрації зосереджена навколо власної частоти ω_1 :

$$G(\omega) = \frac{C}{\omega_0^4} \frac{1}{(1 - \gamma^2)^2 + (\gamma / D^2)}, \quad (18)$$

, а кореляційна функція є загасаним коливанням частоти ω_1 :

$$K(\tau) = \frac{\pi C}{2\delta\omega_0^2} e^{-\delta|\tau|} \left(\cos \omega_1 \tau + \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_1 |\tau| \right) \quad (19)$$

Тут $C = const$ спектральна щільність збудження системи;

δ - коефіцієнт загасання динамічної системи.

Одновимірною щільністю ймовірності нормального квазігармонічного коливання описується законом Гауса:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (20)$$

$A(t)$ можна визначити як:

$$A(t) = \sqrt{x^2 + \frac{x^2}{\omega_0^2}} \quad (21)$$

Щільність одновимірної оболонки описується розподілом Релея:

$$p(A) = \frac{A}{\sigma_x^2} e^{-\frac{A}{2\sigma_x^2}}, A \geq 0 \quad . (22)$$

Среднее значение обвідної:

$$\bar{A} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_x \approx 1,25 \sigma_x \quad . (23)$$

Средньоквадратичнезначення:

$$\sqrt{A^2} = \sqrt{2} \sigma_x \approx 1,41 \sigma_x \quad . (24)$$

Средньоквадратичне відхилення обвідної:

$$\sigma_A = \sqrt{A^2 - \bar{A}^2} = \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}} \sigma_x \approx 0,655 \sigma_x \quad . (25)$$

Коефіцієнт вібрації амплітуд:

$$\gamma_A = \frac{\sigma_A}{\bar{A}} = \sqrt{\frac{4 - \pi}{\pi}} \approx 0,52 \quad . (26)$$

Справедливо і зворотне твердження: якщо обгинає квазігармонічної вібрації не підкоряється закону Релея, то така вібрація ненормально.

Спектрально-тимчасові характеристики її показані на рис. 5.

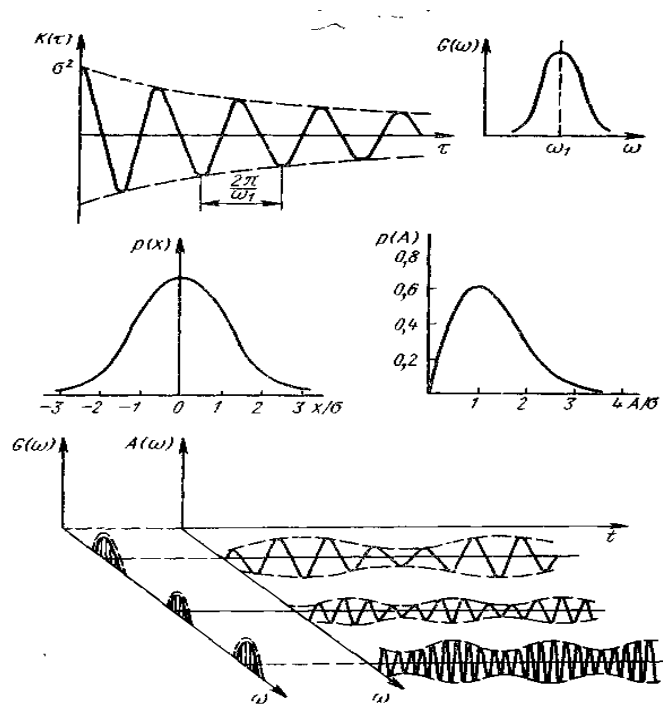


Рис. 5. Характеристики нормальной квазигармонической вибрации.

Сума квазідетермінованих вібрацій і вібраційного шуму

Складові вібрації представлені у вигляді:

$$x(t) = s(t) + n(t), \quad (28)$$

де визначається (11), а - стаціонарний нормальний шум з нульовим середньоквадратичним і середньоквадратичним значенням. Якщо гармонічна складова і шум статистично незалежні і суміщені адитивно, то щільність ймовірності повної вібрації (28) визначається виразом (рис. 6):

$$p(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p(s)p(x-s)ds = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \int_0^{\pi} \exp\left[-\frac{(x - A_0 \cos\psi)^2}{2\sigma_n^2}\right] d\psi. \quad (29)$$

$$\cos\psi = \frac{s}{A_0}.$$

Цей результат відноситься до випадку, коли гармонічна складова має фіксовану фазу. На рис. 6 наведено характеристики суми гармонічної вібрації та нормального шуму.

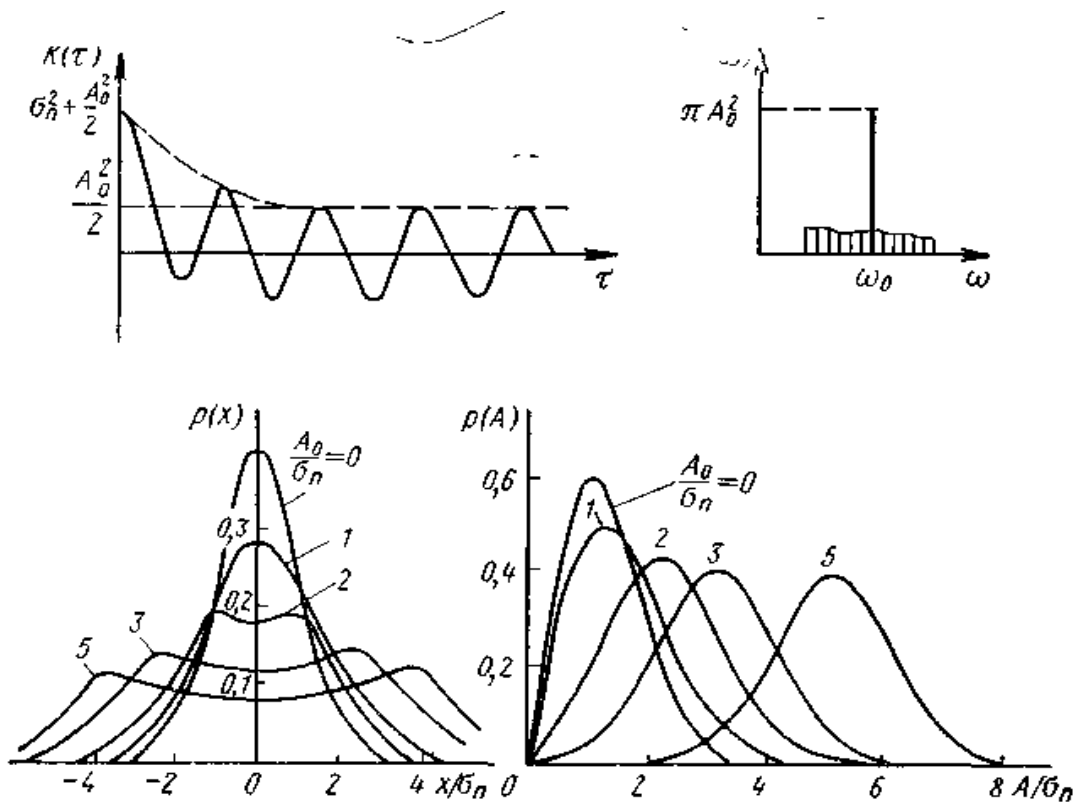


Рис. 6. Характеристики суми гармонічної вібрації і нормального шуму.

Завдяки статистичній незалежності кореляційна функція

та

спектральна щільність сумарної вібрації дорівнюють кореляційним функціям та спектральним густинам доданків відповідно (рис. 6):

$$K_x(\tau) = K_s(\tau) + K_n(\tau); \quad (30)$$

$$G_x(\omega) = G_s(\omega) + G_n(\omega). \quad (31)$$

Щільність вірогідності обвідної $A(t)$ описується законом Райса:

$$p(A) = \frac{A}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{A^2 + A_0^2}{2\sigma_n^2}\right) J_0\left(\frac{AA_0}{\sigma_n^2}\right), \quad A \geq 0, \quad (32)$$

где $J_0\left(\frac{AA_0}{\sigma_n^2}\right)$ – функція Бесселя нульового порядку з уявного аргументу.

Якщо гармонічна складова відсутня, то розподіл Райса стає розподілом Релея (22). Якщо енергія шуму мала порівняно з енергією гармонічної складової, то розподіл Райса близький до розподілу Гаусса з параметрами:

$$\sigma_A = \sigma_n; \quad \bar{A} = A_0. \quad (33)$$

Широко смугова вібрація може містити кілька компонентів:

$$x_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + n_\Sigma(t). \quad (34)$$

2.5 Амплитудно-модульована вібрація

Окрема складова вібрації має вигляд:

$$x(t) = A_0 [1 + mf(t)] \sin(\omega_0 t + \varphi). \quad (35)$$

Якщо $f(t)$ – цестаціонарний випадковий процес з кореляційною функцією $K_f(t)$, фаза φ розподілена і не залежить від $f(t)$, тоді кореляційна функція вібрації визначається виразом:

$$K_x(\tau) = \frac{A_0^2}{2} K_f(\tau) \cos \omega_0 \tau. \quad (36)$$

Спектральна густина визначається кореляційною функцією і має вигляд

дискретної лінії на частотній та симетричній сторонах смуги (рис. 7).

Широкосмугові вібрації можуть включати кілька амплітудно-модульованих коливань:

$$x_{\Sigma}(t) = \sum A_{0i} [1 + m_i f_i(t)] \sin(\omega_{0i} t + \varphi_i) \quad (37)$$

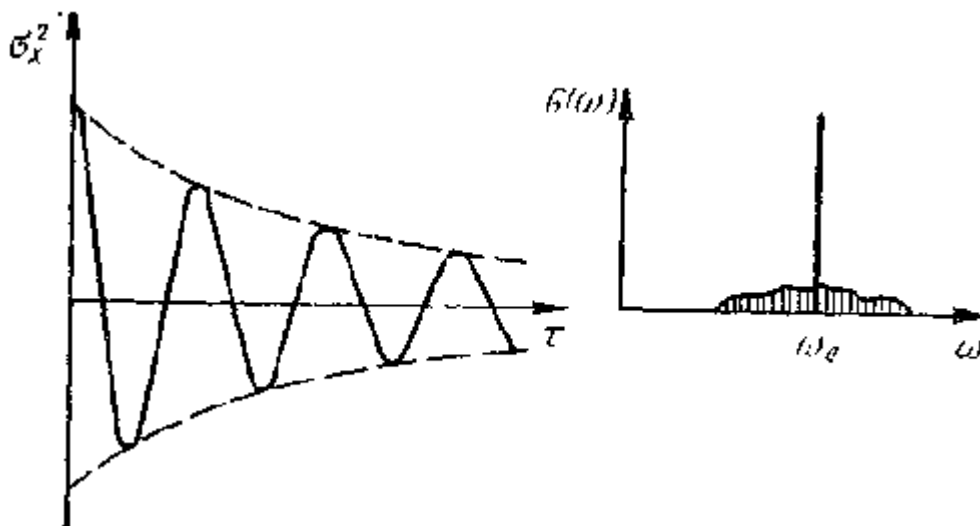


Рис. 7. Характеристика амплітудно-модульованої вібрації.

Перераховані вище моделі не вичерпують усіх можливостей, особливо при імітації широкосмугової вібрації. Іноді може знадобитися використовувати кілька типів моделей вузькосмугової вібрації при складанні широкосмугової моделі вібрації.

2.6 Загальні вимоги до систем вимірювання вібрації

Віброграма (рис. 8) містить кілька записів вібрації в різних точках досліджуваної системи та записи допоміжних параметрів (швидкість двигуна), мітки часу тощо), тому вимірювальна система повинна бути багатоканальною. Вимога щодо дистанції впливає з умов роботи. Відстань від датчиків до вимірювальної системи може становити десятки або сотні метрів.

При визначенні вимог до вимірювального каналу він розглядається як одна фізична система, яка перетворює вхідний сигнал (вібрацію) $x(t)$ у вихідний сигнал (вібраційну діаграму) $y(t)$.

Амплітудна характеристика каналу повинна бути лінійною в межах вимірюваних значень амплітуд вібрації - від мінімальних до максимальної X_{\max} :

$$\frac{Y}{X} = \rho_0 = \text{const}, \quad (39)$$

де ρ_0 - чутливість каналу у вимірюваному діапазоні частот.

За типовими спектрами загальний діапазон частот вібровимірювального обладнання можна вважати рівним, оскільки інтенсивність компонентів вібрації з частотами за межами цього діапазону зазвичай мала.

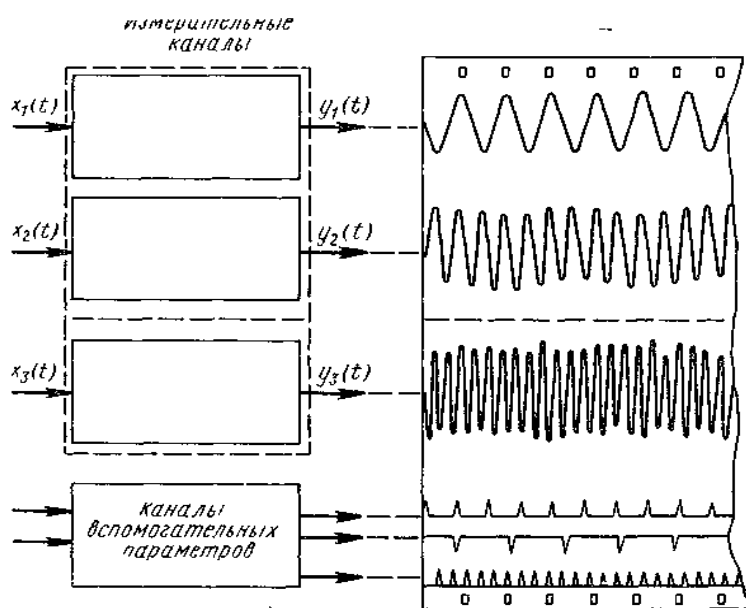


Рис. 8. Структура вимірювальної системи

Для реєстрації параметрів вібрації вимірювальний канал повинен містити ряд приладів.

Кожен вимірювальний канал включає кілька функціональних пристроїв (елементів, ланок), зазвичай з'єднаних послідовно. Датчик D перетворює механічне коливання в електричне. Перетворювач електричного сигналу Pr здійснює різноманітні лінійні перетворення (фільтрацію, інтегрування,

диференціювання). Лінійний підсилювач посилює сигнал до значення, необхідного для реєстрації. Рекордер *P* забезпечує індикацію та запис вібрації на магнітну стрічку. В останньому випадку наявність фільтра не обов'язкова.

Точність вимірювання амплітуди не є особливо суворою, оскільки основний інтерес представляє якісна картина вібрації (її структури, природи, джерела). Допустимі похибки 10-20%. Точність частотних (іноді фазових) вимірювань повинна бути високою (1-2%). Ці параметри часто є вирішальними для виявлення фізичної природи вібрації.

РОЗДІЛ 3

СХЕМА ЛАЗЕРНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ

В даний час лазерні вимірювальні системи з частотною модуляцією використовуються для створення зразкових і робочих приладів у галузі вимірювання параметрів механічних коливань.

Принцип дії лазерних систем для вимірювання параметрів механічних коливань заснований на ефекті Доплера зміни частоти світлового випромінювання при відносному русі приймача і джерела випромінювання. Доплерівська зміна частоти світла, відбитого від об'єкта вимірювання $\omega_d = 2\omega V_r / c$, де ω - кругова частота світлового випромінювання; швидкість об'єкта;

З одночастотних лазерних вимірювальних систем з частотною модуляцією найпоширенішим є двопроменевий інтерферометр або інтерферометр Майкельсона.

У цьому інтерферометрі до приймача посилаються дві електромагнітні хвилі:

- Розсіяні, що містять доплерівський зсув частоти;
- Еталон від джерела когерентного випромінювання (частина лазерного випромінювання).

На рис. 3.1 представлена схема ЛВС. Двочастотний лазер 1 випромінює дві хвилі з частотами ν_1 і ν_2 , одна з яких поляризована паралельно, а інша — перпендикулярно площині креслення. Поляризаційна куба призма 2 розділяє компоненти випромінювання різної частоти і направляє їх на різні плечі. Інтерферометр.

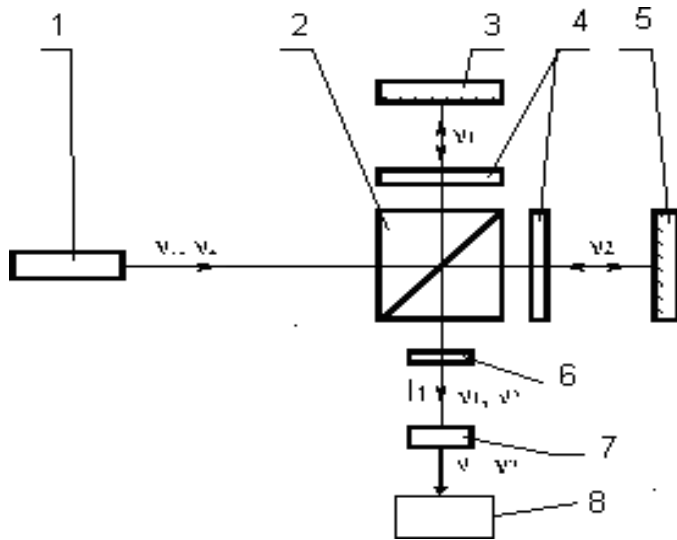


Рис. 3.1

Пластина $\lambda/4$ - положення 4 змінює стан поляризації променів на ортогональний.

Поляризаційний куб призми 2 забезпечує суперпозицію променів, що обертаються відбивачами 3 і 5 у напрямку П. Після поляризаторів 6 в результаті інтерференції променів різної частоти утворюються основні вимірювальні сигнали П биття. випромінювання акустооптичними модуляторами (рис. 3.2), встановленими на вході, виході або в одному з плечей інтерферометра. У цьому випадку опорний сигнал можна отримати безпосередньо з сигналів, що надходять на акустооптичні модулятори.

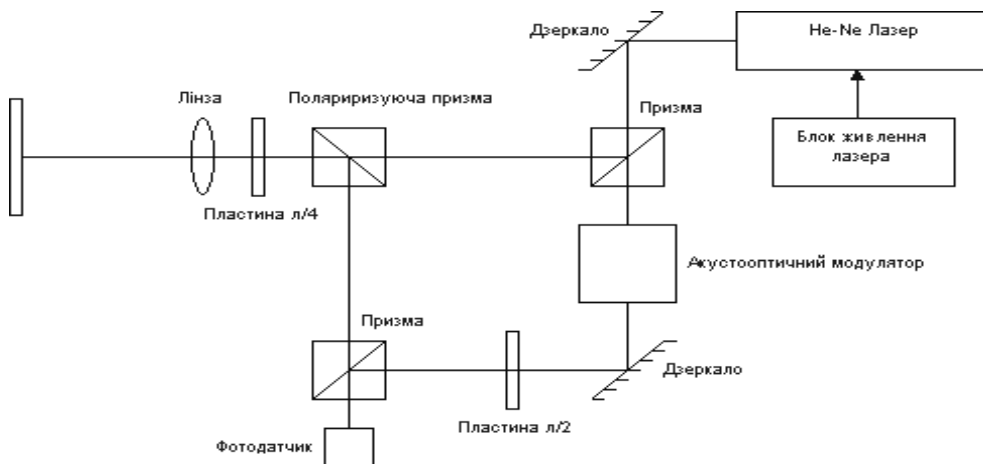


Рис. 3.2

Частота модуляції частоти обмежує час вимірювання. Однак при використанні акустооптичних модуляторів він може бути достатньо великим, щоб можна було ігнорувати ці обмеження. Тоді час однофазного вимірювання

визначається часом затримки приладу для вимірювання фази і становить для сучасних локальних мереж близько 10 нс.

Оскільки локальні мережі на основі частотної модуляції забезпечують на порядок менше часу вимірювання, ніж локальні мережі на основі фазової модуляції, допустимі швидкості зміни ГХ на порядок вищі. Ці локальні мережі вважаються більш придатними для високоточних вимірювань у реальному часі. З такою ж похибкою вони мають дещо більший діапазон вимірювань ГХ.

Частотна модуляція сигналу перешкод забезпечується суперпозицією двох хвиль різної оптичної частоти. У цьому випадку закон зміни інтенсивності має вигляд

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

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

Всі змінні складові сигналу, крім постійної, через високу частоту не можуть бути виявлені фотоприймачем безпосередньо.

Вибір близьких оптичних частот інтерферуючих хвиль, зручних для обробки у фотоелектронній системі. Ця частота називається сигналом биття.

Особливістю сигналу биття є те, що навіть за відсутності змін ГХ між хвилями, що заважають, інтенсивність змінюється за гармонійним законом. Якщо одна з хвиль, що заважають, проходить додатковий геометричний шлях $2L$, сигнал биття отримує додатковий фазовий зсув $\phi = 4\pi L / \lambda$, еквівалентний фазі немодульованого інтерференційного сигналу на довжині хвилі λ на ГХ інтерферуючих променів, що дорівнює $2L$.

Щоб визначити ГХ, вимірюють фазове зрушення $\phi(t) = 2\pi t \cdot \nu_b$

між опорним і вимірювальним сигналами биття:

$$I_0(t) = A_0 \cdot \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t + (\phi_1 - \phi_2)],$$

$$I_1(t) = A_1 \cdot \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t + (\phi_1 - \phi_2) + \phi(t)],$$

де A_0 і A_1 - їхні амплітуди.

основі частотної модуляції існує принцип обмеження швидкості зміни вимірюваних відстаней. У сучасних ЛВС вона не перевищує 1 м/с.

Двочастотні лазерні вимірювальні системи з частотною модуляцією відрізняються від одночастотних тим, що когерентне випромінювання в опорному плечі так чи інакше (наприклад, електрооптичний перетворювач) зміщується за частотою щодо випромінювання у вимірювальному плечі. Наявність несучої частоти у вихідному сигналі фотоприймача, рівно різниці між частотами опорного та вимірювального оптичних сигналів, дозволяє аналізувати вихідний сигнал у діапазоні частот вище низькочастотного шуму фотоприймача та лазера. високі швидкості, частота і довільний закон зміни часу.

Для аналізу параметрів вібрації можна використовувати персональний комп'ютер, але сигнал від фотодатчика спочатку потрібно перетворити в сигнали, які будуть оброблятися безпосередньо на ПК.

На рисунку 3.3. показана блок-схема такого перетворювача. Сигнал від фотосенсора подається на частотний детектор, який перетворює зміну частоти в електричний сигнал, пропорційний швидкості вібрації. На виході інтегратора електричний сигнал вже пропорційний фактичній коливальній швидкості об'єкта. Цей сигнал подається на перетворювач напруги на цифровому вході в персональний комп'ютер.

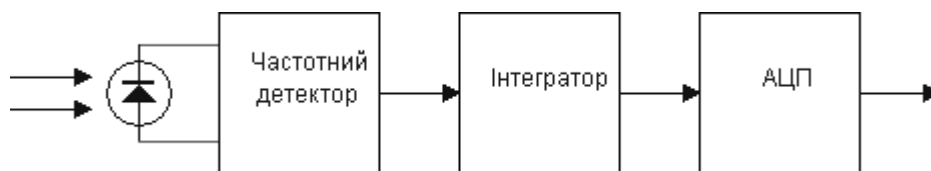


Рис. 3.3

3.1 Лазер

Лазери є джерелами когерентного оптичного випромінювання (оптичне випромінювання є когерентним, якщо його амплітуда, частота, фаза, напрямок

поширення та поляризація постійні або змінюються, але не хаотично, а впорядковані за певним законом), принцип дії якого заснований на використанні індукованого випромінювання.

Слово «лазер» є аббревіатурою англійської фрази «Підсилення світла за рахунок стимульованого випромінювання що перекладається як посилення світла в результаті вимушеного випромінювання. Пристрій, що генерує електромагнітні коливання, заснований на використанні явища наведеного випромінювання в мікрохвильовому діапазоні, був створений в 1953-1954 рр. Н. Г. Басовим і А. М. Прохоровим в СРСР і групою Таунса в США.

3.2 Принцип дії лазера

Енергія атома і молекули квантована, тобто енергія не змінюється постійно, а приймає лише певні значення. Цим енергетичним значенням відповідають рівні енергії. Перехід атома або молекули з одного енергетичного рівня на інший є стрибком. У цьому випадку відповідна частина випромінювання є квантом світла, або, навпаки, фотон поглинається або, навпаки, випромінюється. Коли атом переходить на вищий енергетичний рівень, фотон поглинається; при переході того ж атома на нижній рівень виникає фотонне випромінювання. Енергія поглиненого або випущеного фотона дорівнює різниці енергій між рівнями атома, між якими відбувається перехід. Енергія фотона дорівнює $h\nu$, де ν — частота випромінювання, h — стала Планка ($h = 6,6 \times 10^{-34}$ Дж с).

При взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною збільшення енергії поля відбувається за рахунок спонтанного і наведеного випромінювання, а зменшення - за рахунок поглинання електромагнітного випромінювання. Всі три явища є випадковими і описуються статистичними закономірностями. Імовірності індукованого випромінювання та поглинання пропорційні щільності енергії електромагнітного випромінювання, яке взаємодіє з речовиною. Індукована радіація виникає під впливом електромагнітного поля при переході частинки (атома чи молекули) з верхнього енергетичного рівня на нижній. Індуковане

випромінювання збігається за частотою, напрямком поширення, поляризацією та фазою з випромінюванням, яке його викликало. Саме ця властивість індукованого випромінювання дозволяє отримати когерентне випромінювання за допомогою лазера. Поглинаючи електромагнітну енергію, частинка (атом або молекула) переходить на енергетичний рівень з високим значенням енергії. Такий стан частинки називається збудженим. Мимовільне випромінювання виникає мимовільно при переході частинок з верхнього рівня на нижній. Він не залежить від зовнішніх впливів, а визначається лише властивостями частинок.

Для отримання електромагнітного поля, що взаємодіє з ансамблем частинок однієї структури, необхідно, щоб кількість частинок на верхньому енергетичному рівні була більше, ніж на нижньому. Такий стан ансамблю частинок називають оберненим або оберненим станом заселеності.

«Серцем» лазера є його активний елемент. Просочення — це атоми або молекули, які мають у цьому випадку дуже важливу властивість. Перебуваючи на одному зі своїх верхніх енергетичних рівнів, вони можуть перебувати на ньому відносно довго, не поспішаючи мимоволі повертатися на нижчі рівні. Тому на цьому рівні можна «нагромадити» багато атомів (молекул) – так що, їх буде більше, ніж на нижчих. В результаті буде створено зворотний набір рівнів, необхідний для переваги процесів вимушеного випромінювання світла над процесами поглинання світла. Рівень, на якому може накопичуватися надлишок атомів або молекул, називається довговічністю, а самі атоми і молекули називаються активними центрами.

Поглинаючи випромінювання спеціальної лампи-освітлювача, активні центри збуджуються: вони переміщуються на верхні рівні (рівень 3). Потім вони швидко «спадають» з цих рівнів і накопичуються на довгоживучому рівні (рівень 2), витрачаючи надлишок енергії на нагрівання активного елемента. Активний елемент буде готовий до роботи, коли накопичить набагато більше іонів неодиму, ніж на рівні 1. Тепер достатньо «сигналу», роль якого буде грати фотон, з енергією, що дорівнює різниці енергій рівнів 2 і 1 для переміщення активних

центрів з рівня 2 на рівень 1. В результаті цього переходу виникне лавина фотонів, які будуть лазерним випромінюванням.

У зв'язку з тим, що спонтанно генеровані фотони випромінюються активними центрами неузгоджено в часі і в різних напрямках, для отримання лазерного випромінювання ансамбль частинок повинен перебувати в резонаторі, який у найпростішому випадку являє собою два дзеркала з коефіцієнтами відбиття r_1 і r_2 .

Схематично це показано на рис. 3.4 Напрямок генерації лазера показано на малюнку як 001. Спонтанні фотони, випадково згенеровані в напрямку 001, будуть проходити відносно велику відстань всередині активного елемента, яка також багаторазово збільшується через відображення випромінювання дзеркал резонатора. із збудженими активними центрами ці фотони в кінцевому підсумку ініціюють потужну лавину примусово випромінюваних фотонів, яка утворює лазерний промінь. Що стосується тих спонтанних фотонів, які народжуються в інших напрямках, то вони (як і відповідні лавини вторинних фотонів) пройдуть всередині активного елемента відносно коротко і дуже швидко «вийде з гри».

Таким чином, дзеркала оптичного резонатора випромінюють у просторі певний напрямок, по якому реалізуються найсприятливіші умови для розвитку фотонних лавин. Це напрям лазерного променя, що виходить з резонатора через одне з його дзеркал (так зване вихідне дзеркало; воно частково прозоре для лазерних вимірювань).

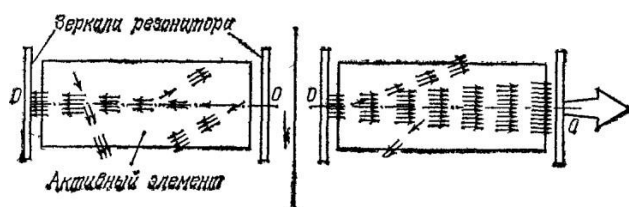


Рис. 3.4. Розвиток фотонної лавини уздовж осі резонатора

Якщо створити обернену населеність в ансамблі частинок, поміщених в резонатор, резонатор буде коливатися з частотою, що відповідає частоті переходу частинок із збудженого стану в основний. Незатухаючі коливання будуть у випадку,

якщо щільність оберненої населеності така, що радіаційні втрати та нерезонансні втрати компенсуються індукованим випромінюванням.

Тому для отримання лазерного випромінювання необхідно мати ансамбль частинок, в якому можна створити обернену населеність, резонатор і пристрій, що забезпечує зворотний стан. Ансамбль частинок, у якому може бути створена обернена населеність, називається активною речовиною або активним елементом лазера. Сукупність елементів, що забезпечують інверсну населеність, називається пристроєм або насосною системою.

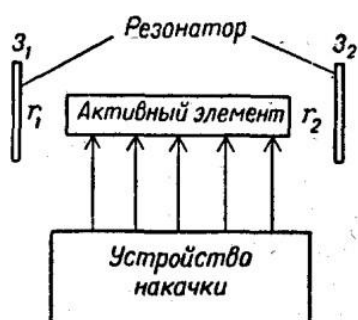


Рис. 3.5. Структурна схема лазера

3.3. Активна речовина лазера

Діюча речовина твердотільних лазерів складається з двох основних компонентів: матриці та активатора. Введення іонів-активаторів у кристалічну основу призводить до появи в активованому кристалі ділянок вибіркового поглинання та спонтанної люмінесценції (центрів фарбування).

Властивості діючої речовини визначаються не тільки активатором, а й матрицею. Матриця повинна бути прозорою, тобто не мати власного або змішаного поглинання на частоті генерації, мати високу оптичну та механічну однорідність, теплопровідність, твердість, термічну та хімічну стійкість. В якості матриць діючих речовин широко використовуються прості кристали оксиду з впорядкованою структурою, наприклад, рубін Al_2O_3 .

В активному елементі - гранаті з неодимом, гранат є прозорим кристалом, активними центрами є іони неодиму, введені в кристал гранату в процесі виготовлення активного елемента. У малому. 3.6, а система енергетичних рівнів іона неодиму в гранаті показана в спрощеному вигляді.

На рис. 3.6, б схематично показано, як збуджувати активні центри в лазері. Активний елемент і лампа підсвічування мають циліндричну форму. Вони розміщені в середині відбивача таким чином, що майже вся енергія світла, що випромінює лампа-лампа, зосереджується на активному елементі (рис. 3.6, в).

Напівпровідникові активні речовини відрізняються тим, що використовують 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 із валентної зони в зону провідності, і утворюється пара електрон-дірка. Як і будь-яка система, електрон і дірка, як правило, займають положення, відповідне мінімуму енергії, тому електрон прагне зайняти прийнятне положення біля дна зони провідності, а дірка - біля стельової валентної зони.

У рідких лазерах використовується як діюча речовина:

- розчин неорганічних сполук рідкоземельних елементів (європій, тербій або неодим),

барвники - складні органічні сполуки з інтенсивними смугами поглинання у видимій та ультрафіолетовій областях спектра.

У рідких лазерах з рідкоземельними елементами лазерне випромінювання виникає при переходах з метастабільних іонних рівнів цих елементів, збудження активного іона в металоорганічній рідині відбувається в результаті внутрішньомолекулярного перенесення енергії від органічної частини комплексу до іону. У лазерах на органічних барвниках діюча речовина - барвник, а матриця - розчинник. У рідких лазерних середовищах можна досягти високої концентрації активних частинок, що дає змогу, як і в твердотільних лазерах, отримувати високі енергії та

потужності випромінювання на одиницю об'єму діючої речовини. Рідини не мають постійних напружень, структурних неоднорідностей і включень, внаслідок чого їх оптичні характеристики є ізотропними та постійними за об'ємом, що сприяє утворенню випромінювання з високим ступенем просторової когерентності та спрямованості. Рідкі лазери не викликають необоротного руйнування діючої речовини при високій щільності енергії.

До недоліків рідких лазерних матеріалів можна віднести високі значення температурних змін показника заломлення, що призводить до значних оптичних неоднорідностей і погіршення характеристик генерації.

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

Для них характерна висока монохроматичність і спрямованість випромінювання, оскільки гази мають значно меншу щільність і більшу однорідність.

Крім того, газоподібні середовища збуджуються внаслідок різних процесів - зіткнень при електричному розряді, хімічних реакцій, оптичної накачки. {1}} Газові лазери використовують як діючу речовину:

нейтральні атоми газів (H, He, Ne та ін.), Метали (мідь, золото, титан, ітербій тощо); } · Іонізовані атоми аргону (Ar), ксенону (Xe), азоту (N), свинцю (Pb) тощо;

· оксид вуглецю, CO₂ (діоксид вуглецю), H₂O (вода) та молекули інших газів

В діючих речовинах на нейтральних і іонізованих атомах для отримання лазерного випромінювання використовуються переходи між електронними рівнями, а в молекулярних лазерах — між електронним, електронно-коливальним, коливальним, коливно-обертальним і чисто обертовими рівнями.

Типовим представником лазера на нейтральних атомах (атомних) є гелій-неон. Його перевагами є консистенція випромінювання, низьке енергоспоживання (8 ... 10 Вт) і невеликі розміри. Основними недоліками є низький ККД (0,01 ... 0,1%) і низька вихідна потужність, що не перевищує 60 МВт. Цей лазер також може працювати в імпульсному режимі, якщо для збудження використовується імпульсна напруга високої амплітуди в одну мікросекунду.

Основними напрямками практичного застосування гелій-неонових лазерів є науково-дослідні та вимірювальні технології.

3.4. Резонатори

У лазерній техніці відбивачі (дзеркала) використовуються як резонатори, між якими знаходиться активна речовина. У найпростішому випадку відкритий резонатор складається з двох плоскопаралельних дзеркал. А. М. Прохоров запропонував використовувати його для отримання генерації в субміліметровій та інфрачервоній смугах хвиль. Головною особливістю оптичного діапазону довжин хвиль є те, що довжина хвилі електромагнітного випромінювання в цьому діапазоні дуже мала, так що майже завжди розмір резонатора значно більший за довжину хвилі.

У відкритому резонаторі втрачається значна частина енергії для тих хвиль, перпендикулярних напрямку перпендикулярний.

площин дзеркала бовідхилених від нього

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

Спектр лазерного випромінювання визначається головним чином шириною лінії люмінесценції активної речовини та власними частотами резонатора. Лазер випромінює лише на частотах, які є власними частотами резонатора, збігаються з лінією світіння і коефіцієнт підсилення якого достатній для компенсації всіх втрат в резонаторі.

Лінія люмінесценції - це розподіл частоти інтенсивності випромінювання. Лінія люмінесценції характеризується формою, а найпростішою характеристикою форми лінії є її ширина $2Df$, тобто різниця між частотами, інтенсивність поглинання (випромінювання) при якій задана кількість разів менше інтенсивності, що відповідає максимальному поглинанню (радіація). Ширина і форма лінії залежать як від зовнішніх умов, в яких знаходиться атомна система, так і від внутрішніх умов, тобто від природи атомної системи.

У тих авіаційних системах, які не потребують сильного монохроматичного випромінювання, використовуються лазери, які працюють у багаторежимному режимі, оскільки реалізована максимальна ефективність.

У газоподібних активних середовищах ширина лінії світіння значно менша. У газових лазерах набагато легше досягти одномодового і навіть одномодового та одночастотного режимів, ніж у лазерах на конденсованих середовищах.

Одномодовий та одночастотний режим характеризується дуже вузьким спектром.

3.5. Оптичні датчики

Безконтактне вимірювання ряду фізичних величин, таких як переміщення, вібрація, температура тощо, можливо лише за допомогою оптичних датчиків. При цьому інформація передається не по кабелю, а за допомогою світлових хвиль, які можуть змінюватися за інтенсивністю, фазою або геометричним розподілом кольору в просторі і, отже, придатні для прийому та передачі інформації. Надзвичайно простим оптичним датчиком є, наприклад, відомий фотоелемент.

Фотоелемент складається з джерела світла (лампа розжарювання або світлодіод) і приймача (фотодіод або фоторезистор). Порушення передачі світла від джерела до приймача служить інформацією про наявність об'єкта у фотоелементі. Якщо кількість імпульсів віднести до одиниці

часу, то, наприклад, у конвеєрній промисловості можна отримати інформацію про кількість виготовлених деталей за 1 годину або за добу.

ефектів.

3.6. Фотодіоди

Коли кремнієві фотодіоди опромінюються світлом, вони мають напругу, яка дещо залежить від інтенсивності світла. Ефект, який викликає цю напругу, називається внутрішнім фотоефектом.

На практиці найчастіше використовуються кільцеві діоди. Кремній (и) з високим опором. При попаданні променів світла з достатньо високою енергією ($E = h\nu$) на пі-перехід створюється фотострум I_{sh} (струм короткого замикання) порядку 0,1 ... 1 А / Вт. Чутливість такого фотодіода значною мірою залежить від довжини хвилі (колір) використовуваного випромінювання. У малому. 2.8 і показує спектральну чутливість типового кремнієвого фотоелемента в діапазоні довжин хвиль від 200 нм до 1,2 мкм (1200 нм) для кількості електронів, що генеруються у вигляді фотоструму I_{sh}

фотострум I_{sh} . змінюється лінійно з інтенсивністю падаючого світла, коли вона змінюється більш ніж на 6 порядків, що дає можливість безпосередньо вказати інтенсивність світла.

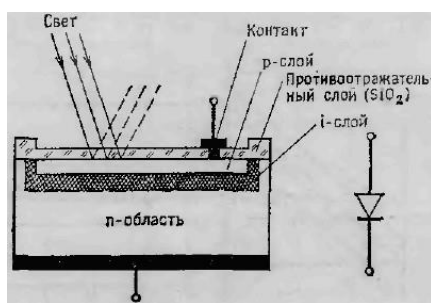


Рис. 3.7. Структура р-і-п діода.

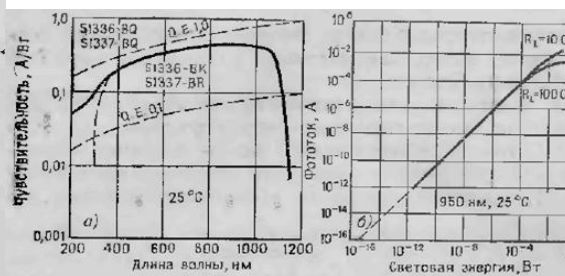


Рис. 3.8. Характеристики р-і-п діода.

Нижній діапазон цієї характеристики обмежений шумом (шум Джонсона, темний шум і дробовий шум). Цей параметр визначається як відношення струму шуму (в

$A/Гц^{1/2}$) до чутливості до світлового потоку (в $A/Вт$) при відношенні сигнал/шум 1. Оскільки чутливість до потоку випромінювання залежить від довжини хвилі, те саме стосується і EPS . Виробники радіаційних детекторів часто вказують значення EPS на максимум кривої чутливості, і майже завжди в звичайних детекторах випромінювання вона становить приблизно $10-15 Вт / Гц^{1/2}$.

Перетворення слабких фотострумів порядку $10^{-8} .. 10^{-2} А$ вимагає ретельного підбору схем підсилювача. Типові схеми перетворення струм – на напругу наведені на рис. 3.9, а і б.

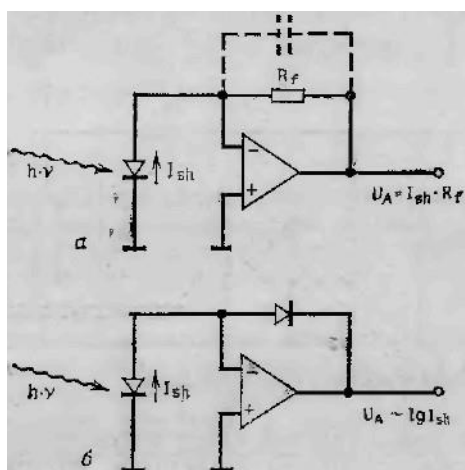


Рис. 3.9. Лінійне (а) і логарифмічне (б) посилення по струму.

Перетворення струму в напругу з лінійністю вихідної напруги здійснюється за допомогою резистора R_f в ланцюзі зворотного зв'язку операційного підсилювача.

Для

високого посилення слабких фотострумів використовуються операційні підсилювачі на польових транзисторах з високим вхідним опором ($10^{11} Ом$) і високоомними резисторами R_f .

При обробці сигналів змінної напруги амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) схеми визначається ємністю фотоелемента і опором R_f .

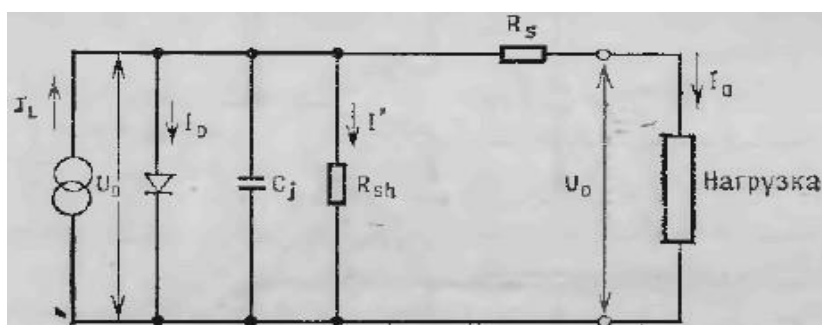


Рис. 3.10. Еквівалентна схема рiн-діода.

Якщо в схему зворотного зв'язку операційного підсилювача включити діод, то вийде логарифмічно зростаюча характеристика, найбільш придатна для великих діапазонів вимірювань (рис. 3.9,6).

Еквівалентна схема фотодіода може бути представлена у вигляді схеми від джерела струму (I_L), діода (ID), конденсатора (C_j), резистора (R_{Sh} шунтуючий резистор зі струмом I') і резистора, з'єднаного послідовно (R_s). (рис. 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 неважити, так що виходить

$$I_{sh} \approx I_L$$

В основному вони відрізняються геометричними формами. При виборі відповідної конструкції слід враховувати, що ємність рп-переходу C_j збільшується з збільшенням його площі і таким чином впливає на АЧХ всієї схеми. Однак, оскільки опромінення поширюється на всю поверхню, за допомогою детекторів більшої площі можна домогтися збільшення вихідного струму. Тому в кожному конкретному випадку потрібна оптимальна координація.

При установці фотоелементів (особливо для УФ-діапазону) переконайтеся, щоб вікна детектора перед установкою промити етиловим спиртом.

При пайці необхідно виключити можливість перегріву фотоелемента, а нагрівання кожного спаю допускається до 260 ° С протягом 5 ... 10 с.

3.7. Конвертер світло-напруга

Оскільки для перетворення слабких фотострумів необхідний ретельний підбір схем підсилювача, ми використовуємо перетворювач світло-напруга, в якому великий фотодіод великої площі поєднується з підсилювачем так, що вихідний струм фотодіода перетворюється в напругу. Інструменти для датчиків інтенсивності світла для створення вбудованих фотосенсорів. Фотодіод із прозорого пластику, виготовлений за допомогою цього процесу, є сенсорним від 400 нм до 1100 нм (видима та інфрачервона область). Вбудовані датчики світла TSL250 і TSL230 повністю відповідають цьому спектральному діапазону.

Перетворювач світла в напругу TSL250 вирішує деякі основні потреби застосування. Це особливо підходяще рішення для аналогового вимірювання низького рівня освітленості в середовищі з електричним шумом.

Внутрішня схема цього перетворювача і його зовнішній вигляд показані на рис. 3.11.

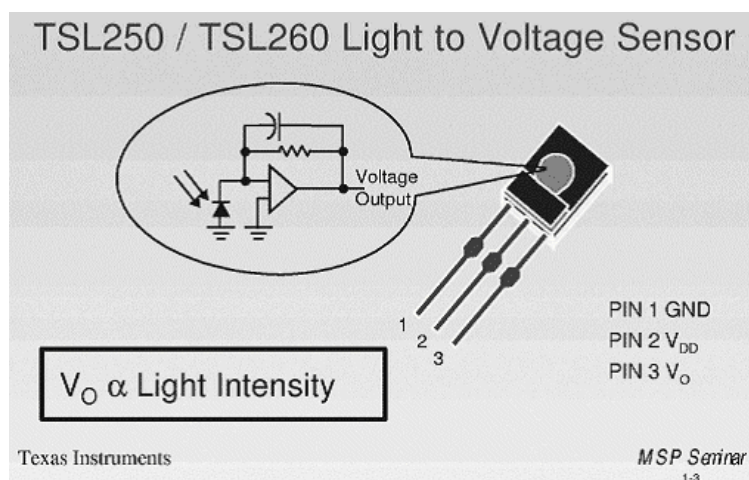


Рис. 3.11

Виготовлено три варіанти приладу, з різними розмірами площі фотодіода і внутрішніми значеннями резистора зворотного зв'язку, що дозволяє встановити 3 значення швидкісної чутливості.

Параметри чутливості

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

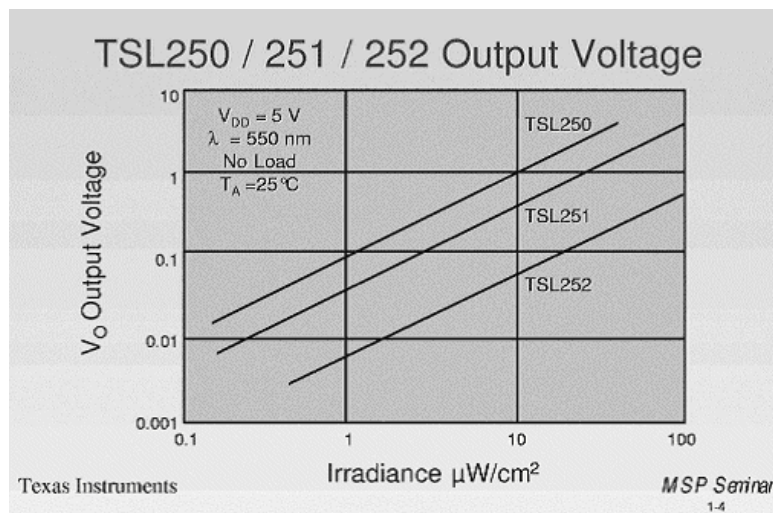


Рис. 3.12.

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

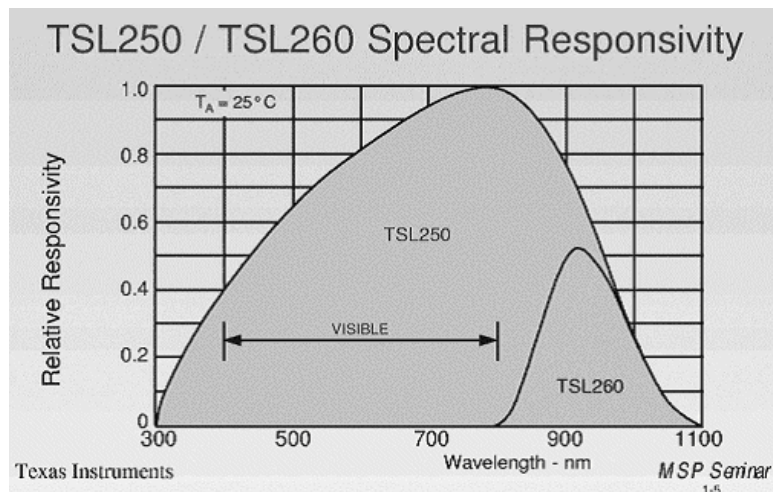


Рис. 3.13.

Трансїмпедансний підсилювач LinCMOS™ (аналог підсилювача TLC272) забезпечує стабільне перетворення вхідного сигналу. TSL250 пропонує розширений динамічний діапазон з лінійною потужністю до 3 В і випромінює лише 3 мВ в темряві. Це робить TSL250 менш чутливим до зовнішніх електричних

шумів, тому дуже стабільний датчик можна реалізувати без дорогих і громіздких методів екранування.

Сімейство TSL250 має високолінійну, стабільну вихідну напругу з низьким опором. сигнал змінюється на 1 мікрвольт на 1 градус Цельсія. Це пояснюється тим, що температурний коефіцієнт полікристалічного кремнієвого резистора зворотного зв'язку компенсує температурний коефіцієнт фотодіода. струм (800 мА при $V_{DD} = 5\text{ В}$ і фотодіодному освітленні).

Сімейство TSL250 виготовлено з міцного прозорого пластику. Для таких програм, як інфрачервоний пульт дистанційного керування, коли на пристрій не може впливати зовнішнє видиме світло, встановлюється фільтр, що блокує видиме світло, а датчики виготовляються з пластику, який пропускає інфрачервоний діапазон. Сімейство датчиків, призначених тільки для інфрачервоного діапазону - TSL260, TSL261 і TSL262. Чутливість цих приладів приблизно вдвічі нижча.

Внутрішній зворотний зв'язок в підсилювачі збільшується з TSL252 до TSL250. Зі збільшенням зворотного зв'язку швидкість зменшується. Тому TSL252 має найвищу продуктивність.

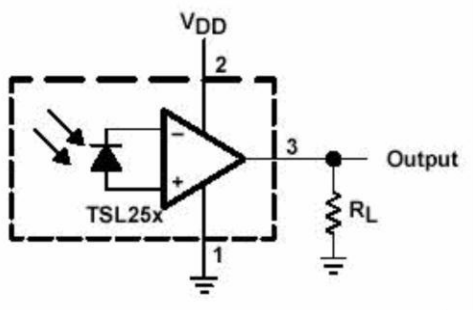


Рис. 3.14

При напрузі живлення 5 В TSL250 / TSL260 дає на виході приблизно 3 В - 3,5 В. Використання резистора дозволяє розширити лінійний діапазон. Найнижчий рівень темряви виходить при великому значенні резистора, але це знижує швидкість. При значенні резистора 100 кО можна виміряти низький рівень освітлення, рівень темряви - 3 мВ. Щоб використовувати TSL262 на максимальній швидкості в цій простій схемі, значення резистора необхідно зменшити до 1 кО, а рівень темряви збільшиться до 15 мВ.

3.8. Частотний детектор

Частотний детектор побудований за схемою з постійною частотою порівняння фазового детектора. Незважаючи на просту схемотехніку і доступну елементну базу, детектор за частотою вихідного сигналу і рівнем фазового шуму не поступається набагато складнішим приладам.

Частотний детектор складається з кількох функціональних блоків. Генератор вхідного сигналу складається з транзистора Q1 і додаткових елементів R1, R2, R3, що забезпечують потрібне зміщення сигналу. Зміщення необхідне для того, щоб передати сигнал на наступний каскад (компаратор фаз) тільки логіки КМОП: рівень логічного нуля нижче 0,3Uд.ж., логічної одиниці вище 0,7Uд.ж..

Конденсатор С1 виділяє змінну складову вхідного сигналу.

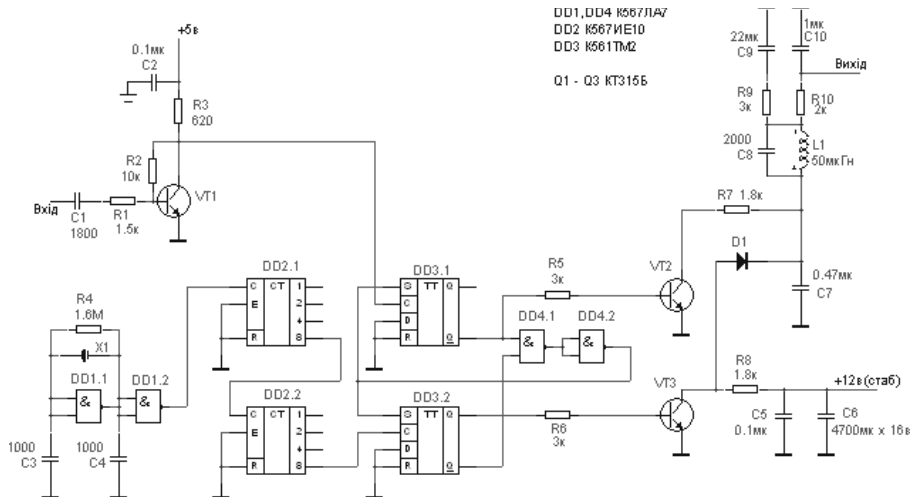


Рис. 3.15.

Важливим елементом детектора є опорний генератор. Від його стабільності залежить точність виявлення вихідного сигналу. Генератор виконаний на мікросхемі DD1, її елементом, що задає частоту, є кварцовий резонатор. Для підвищення стабільності частоту опорного генератора ділять на 64. Цю операцію виконує дільник DD2. Саме з частотою, що надходить від дільника, порівнюється вхідний сигнал. Частота порівняння повинна дорівнювати частоті, на яку зміщується еталонне лазерне випромінювання. Тому частота кварцу повинна бути в 64 рази вище.

Кварцовий резонатор можна замінити на менший з відповідним зниженням коефіцієнта поділу з 64 до 32 або 8.

Порівняння частот відбувається у фазовому детекторі, що складається з елементів DD3, DD4. Фазовий детектор являє собою простий каскад «виключає АБО». Для його хорошої роботи і збільшення дальності необхідно надати строго симетричний вхідний меандр. Схема така, що без вхідного сигналу (або коли він дорівнює опорному) на його виході виникає потенціал $U_{zh} / 2$. За допомогою цього компаратора смуга спостереження при зміні вхідної частоти залишається в заданих межах при сильних збуреннях. Такий компаратор краще забезпечує спостереження на частотах, близьких до гармонік опорної частоти. Особливість використання FC полягає в тому, що фазовий кут між сигналом і виходом компаратора змінюється від 0 до 180 °. На центральній частоті кут дорівнює 90 ° - чверті періоду, коли існує рівність частот між напругою сигналу та напругою опорного генератора, а кут зсуву відповідає 1/4 періоду. У цей момент вихідна напруга є меандром.

Постійна складова такого меандра $U_{j}/2$, однак, навіть після хорошого фільтра нижніх частот вихідна напруга має деяку складову другої гармоніки опорної частоти. Цю перешкоду подолати найважче. Дальність спостереження за допомогою FC визначається смугою низьких частот.

Вихідний сигнал знімається з фільтра нижніх частот - фільтра нижніх частот: R9, R10, C9, C10, де згладжується імпульсний сигнал, що формується фазовим компаратором.

L1, C8 налаштовують на частоту, на якій зміщується еталонне лазерне випромінювання -15,625 кГц, вибираючи L1, C8. L1 намотується на будь-яке феритове кільце діаметром 16..20 мм з проникністю 2000..3000 Нм. Співвідношення L/C цього фільтра не є критичним.

3.9.Інтегратор

Як відомо, швидкість $V = dS / dt$, де S - переміщення. Якщо ми хочемо отримати вібраційне зміщення, нам потрібно інтегрувати сигнал вібраційної швидкості. Для цього ми використовуємо інтегратор.

Найпростіший інтегратор заснований на інвертуючому операційному підсилювачі, в якому резистор зворотного зв'язку замінений на конденсатор.

Вихідна напруга підсилювача описується вираженням

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

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.

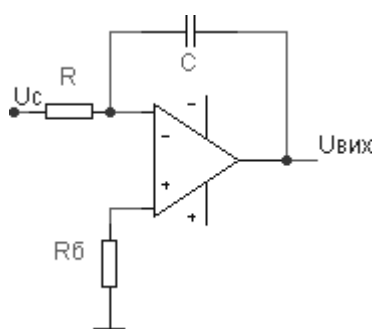


Рис. 3.16

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 через опір джерела сигналу, тому в неінвертуючій вхідній схемі входить балансувальний резистор $R_b = R$.

Точність інтегрування значною мірою визначається рівнем електричних втрат в конденсаторі, оскільки конденсатор має свою постійну часу $T_0 = R_{із}$, де $R_{із}$ – еквівалентний опір ізоляції.

Зменшення похибок інтегрування досягається використанням активного інтегратора з операційним підсилювачем (рис. 3.17), охопленого зворотним зв'язком.

Ефективна постійна часу інтегрування такої схеми визначається виразом $\tau = (1 + A) \tau'$, де $\tau' = R_1 C_1$ — постійна часу; A — коефіцієнт підсилення операційного підсилювача.

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

Інтегратор виконаний на ОУ К140УД1Б або К140УД1А, які мають широку лінійну зону (± 8 В) і коефіцієнт посилення до 4000, що забезпечує високу точність інтегрування. Підсилювач урівноважений резистором R5. Час інтегрування визначається елементами R1 і C1. Похибка інтегрування становить 0,5% від максимального значення сигналу на частотах 1..20 кГц і близько 1,5% на частотах 20..100 кГц.

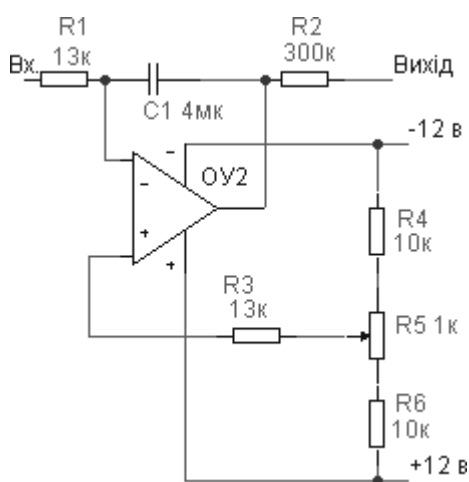


Рис. 3.17

3.10. Основні положення, що враховуються при конструюванні

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

Аналоговий і цифровий блоки повинні бути розміщені на різних платах і встановлені в окремих екранованих відсіках корпусу. Церізок виключає вторгнення аналогових компонентів в аналогові пристрої, які виникають під час перехідних процесів у цифрових пристроях.

Імпульсні перешкоди, засновані на вищих гармоніках, можуть легко проникати в сусідні вузли через загальні схеми живлення. Тому аналогові та цифрові пристрої в основному живляться від окремих джерел.

Якщо використовується загальне джерело, необхідно використовувати схеми широкопasmової ізоляції на основі RC або LC фільтрів.

Провідники друкованої плати та дроти, що несуть ВЧ струми, є антенами, здатними як випромінювати, так і приймати ВЧ коливання, тому довжина таких провідників повинна бути мінімальною. } Часто джерелом паразитичної FM або AM модуляції є джерело живлення, яке слабо згладжує пульсації вихідної напруги. Необхідно забезпечити для живлення PD остаточну величину напруги пульсацій не більше 0,1..0,2 мВ, тобто напруга PD має бути виключно добре згладженим.

Номинальні значення резисторів і конденсаторів, зазначені на схемах, усереднені. У конкретних випадках вам потрібно буде виділити деякі елементи. Наприклад, вибір постійної часу ФНЧ залежить від необхідності встановлення двох суперечливих параметрів - швидкості спостереження за змінами частоти і рівня придушення сигналів опорної частоти (збільшення постійної часу зменшує швидкість спостереження за змінами частоти).

Струмів, що виникають внаслідок витоків статичної електрики з рук монтажника, рекомендується прокладати провідники подалі від країв плати. Також слід зазначити, що всі найсуворіші заходи захисту електростатичних датчиків можуть бути безглуздими, якщо персонал не дбало ставиться до плат.

Поруч із сигналами корисно прокласти захисні провідники, щоб заряд витікав на землю. У вхідних ланцюгах всіх чутливих елементів рекомендується розміщувати захисні елементи, наприклад обмежувальні діоди. Щоб зменшити перешкоди та шум, необхідно забезпечити хороше заземлення з низьким опором.

Як і окремі компоненти, захист системи в цілому дозволяє значно зменшити шкідливий вплив зовнішніх електромагнітних перешкод. Принцип дії екрану полягає в чіпглинанні електромагнітних і електростатичних полів. На низьких частотах магнітне поле поглинається, на

високих відбивається. Високочастотне відбивання виникає через невідповідність між низьким опором металу і високим опором хвильового фронту.

Для захисту від низькочастотних електричних полів рекомендується використовувати екрани з немагнітних матеріалів, наприклад, алюмінію або міді, оскільки вони краще відбивають небажані промені.

Для захисту від низькочастотних магнітних полів використовуються матеріали з високою магнітною проникністю, такі як залізо, сплави феронікелю, мю-метали і пермалой.

Магнітна проникність цих матеріалів зменшується зі збільшенням частоти, тому їх екрани на високих частотах неефективні. Однак у цьому випадку добре працюють мідні та алюмінієві екрани, оскільки вони відбивають падаючу хвилю через різницю між опорами середовища та екрана. Високопровідні матеріали, такі як мідь або алюміній, корисні для захисту від електричних полів, але малоефективні для низькочастотних магнітних полів.

Важливо забезпечити безперервний екран навколо системи, яку потрібно захищати. Для усунення витоків всі отвори на екрані повинні мати діаметр не більше $1 / 20$, де 1 - мінімальна довжина хвилі сигналів. Іншими словами, не повинно бути отворів, які виконують роль щілинних антен. Невикористані розетки також можуть виконувати роль антен, тому їх необхідно накрити вбираючим матеріалом. Всі ізоляційні елементи повинні мати достатню діелектричну міцність, щоб уникнути пробоя під впливом сильного електричного поля. Установка роз'ємів усередині поглиблень допомагає уникнути випадкового контакту з предметами, зарядженими статичною електрикою. Усі кабелі, що використовуються для введення сигналів до екранованого корпусу, мають бути екранованими, а їх оплетка має добре контактувати з корпусом, щоб уникнути впливу антени.

3.11. Програмні аналізатори спектра

Аналізатори спектру можна розділити на два основних класи - реального часу і так звані нелінійні (офлайн). Перші обробляють звуковий сигнал безпосередньо від АЦП звукової карти, динамічно відображаючи спектр, другі вимагають відображення спектру - статичного або динамічного.

Аналізатори розроблені для «оголеної машини» (DOS) і деяких звукових карт середнього рівня (зазвичай SoundBlasterPro або GravisUltrasound), а нові орієнтовані на Microsoft Windows, що дозволяє використовувати будь-яку звукову карту

Принцип дії будь-якої програми такого типу полягає у виконанні над фрагментом оцифрованого звуку операції швидкого перетворення Фур'є (FFT, або FastFouriertransform - FFT), в результаті чого утворюється послідовність миттєвих значень амплітуди на інтервалі часу. буде перетворено в набір амплітуд частотних складових на цьому сегменті, який відображається у вигляді спектральної діаграми.

Кількість компонентів, отриманих від ШПФ, завжди дорівнює степені двійки (2-4-8-16-32 тощо).

ШПФ тісно пов'язане з концепцією так званої функції згладжування (намотки), яка називається усуненням «зламаного» характеру обробленого сигналу, що генерується кінцевою довжиною кожної групи вибірок, відібраних для ШПФ. Функція згладжування забезпечує мінімальні вимоги до перетворення Фур'є - нульову амплітуду початкової і кінцевої вибірки, а в ідеалі - поступове збільшення амплітуди сигналу на початку ряду і поступове його ослаблення в кінці, запобігаючи перетворення. помилки та поява сторонніх частотних складових. Такою функцією може бути синус (Хеммінга, Ганінга), трикутник (Парзен), квадратична функція (Уелч) або просте обнулення екстремальних показань (Прямокутник). і динамічний - коли фрагменти оцифрованого аудіо регулярно вводяться безпосередньо зі звуку або карти попередньо підготовленого файлу і регулярно відображаються у вигляді "живої" графіки. У

цьому режимі також використовується

«тривимірне»

відображення серії миттєвих графіків на осі часу.

При достатній швидкості комп'ютера можлива робота в режимі реального часу, коли відображення спектру синхронізовано з вхідним сигналом. Однак, незважаючи на відносно швидкий алгоритм ШПФ, його обробка вимагає значних обчислювальних ресурсів, тому за відсутності швидкості доводиться вдаватися або до попереднього запису з подальшим повільним прокручуванням, або до «протонування» вибірок, підтримуючи режим реального часу.

З програм DOS найбільш відомі дві програми, розроблені Філіпом Ван Бареном – Freq і Spectrogram, які можна знайти на <ftp://spider.nrcde.ru/pub/sound/other/> під іменами freq4.zip і specgram.zip, відповідно. Обидві програми працюють в режимі реального часу; перший відображає знімки спектральних графіків, а другий – «тривимірний» графік час-частота-амплітуда, в якому амплітуда представлена кольорами різної яскравості. Пакет freq4 зосереджений на стандартному режимі VGA (640x480x16), пакет specgram на VESA-сумісних режимах (800x600x256) і вимагає або карти VESA BIOS, або карти SVGA з апаратною підтримкою цього режиму та драйвером VBE (VESA BIOS Extension).

Кожна програма виконана в двох версіях - для звичайного SoundBlaster і сумісних карт (sbfreq, sbspec) і для Media Vision Pro Audio Spectrum 16 (PAS 16) - частота, спектрограма. Універсальна версія працює з 8-бітною оцифровкою (відношення сигнал/шум близько 50 дБ), версія для PAS16 - з 16-бітною (близько 98 дБ). Однак слід мати на увазі, що оцифровка сигналів з рівнем шуму 96-98 дБ реалізується лише деякими професійними картами, такими як Darla або Fiji, та й то лише з хорошим блоком живлення, материнською платою та периферією, більшість сучасних карт мають рівень шуму 75-90 дБ

Обидві програми отримують параметри з файлів INI, а деякі параметри можна замінити параметрами командного рядка. Крім того, деякі режими можна замінити з клавіатури під час роботи. Спектр представлений

гістограмою, де кожен стовпець відповідає своїй частотній складовій.

Основні параметри програми:

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

- Кількість точок Фур'є – визначає точність спектрального графіка, який складається із заданої кількості частотних складових. Число потрібно подвоїти і може варіюватися від 8 до 2048. Збільшення кількості балів уповільнює роботу програми.

- Тип функції згладжування.

- Тип осей графіка - логарифмічний або лінійний.

- Частотно-амплітудний масштаб - початок відліку і ширина області по горизонталі і вертикалі.

- Тип корекції АЧХ - лінійна або наростаюча (PRO, 3, 6, 9, 12 дБ / жовтень).

Використовується для компенсації зниження амплітуд вищих гармонік, що дозволяє чіткіше бачити їх на графіку. При цьому визначається частота, з якою АЧХ починає збільшуватися. Freq також можна налаштувати на відображення миттєвих значень, коли кожне послідовне відображення діаграми стирає попереднє зображення або режим утримання максимальних значень при їх повільному зниженні (зниженні). Візуально це виглядає як «кидання» стовпців своїх пікових значень, які потім повільно ковзають вниз.

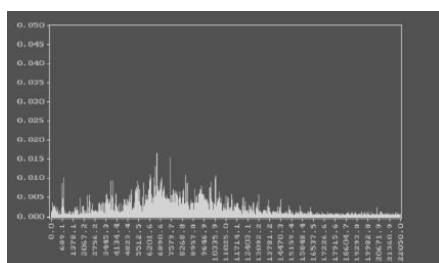


Рис. 3.21

- Крім статичних параметрів, в активному режимі доступний ряд команд оперативного управління – зміни частоти дискретизації, обсягу БПФ,

логарифмічної/лінійної шкали осей, частотної характеристики, типу віконної функції, компонента відображення з максимальною амплітудою та інших.

- Робоча частота показана на рис. 3.21.

- На основі пакета ШПФ, виготовленого Філіпом Ван Бареном, Р.С. Номе розробив просту програму для Windows 3.1 під назвою Spectrogram (<http://src.doc.ic.ac.uk/Packages/Windows3/Sounds/gram23.zip>). Він не підтримує режим реального часу - замість цього вихідний сигнал спочатку записується або береться в готовому вигляді з файлу, а потім обчислюється спектрограма, яка відображається у вікні прокрутки в «тривимірному» вигляді, подібно до вихідна спектрограма; звичайна форма сигналу відображається у верхній частині вікна. Програма відстежує положення курсору миші у вікні спектрограми і видає точні координати (час/частота); на жаль, точне значення амплітуди цієї складової не отримано. Однак, як уже говорилося, програма використовує стандартний інтерфейс з аудіопристроями Windows, тому може працювати «на повну силу» з будь-якою звуковою картою, яка має драйвери для Windows.

- Дуже функціональна програма для платформ Win32 (Windows 95 / Windows NT, Windows 3.1 + Win32s) під назвою SpectraLAB, розроблена SoundTechnologyInc. Пакет SpectraLAB і великий (близько 90 МБ) набір різноманітних звукових прикладів доступні під назвою Spectra PLUS.

- · SpectraLAB — надзвичайно потужний інструмент для аналізу звуку. Результати обробки сигналів можна відобразити в п'яти форматах (Перегляд): TimeSeries – звичайна осцилограма (рис. 3.25), Spectrum-"миттєва" спектрограма (мал. 3.26.) на зразок виведеної freq.

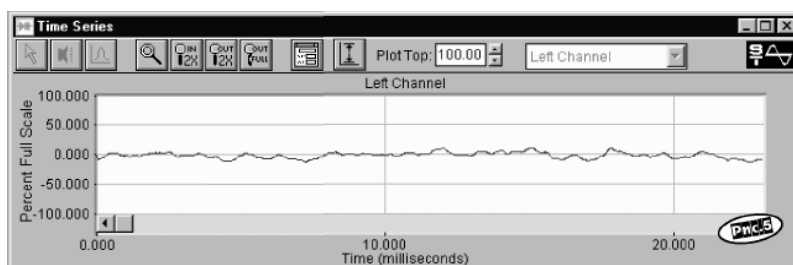


Рис. 3.22

- · Спектр може відобразитися у виді лінійного графіка чи стовпчиккової діаграми. Пункти Overlay служать для

рівнобіжною відображення у вікні до чотирьох допоміжних спектральних графіків різних колорів, з яким 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.

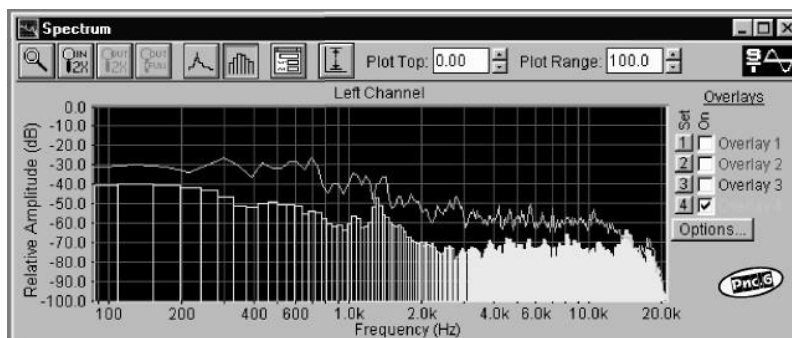


Рис. 3.23

- 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.

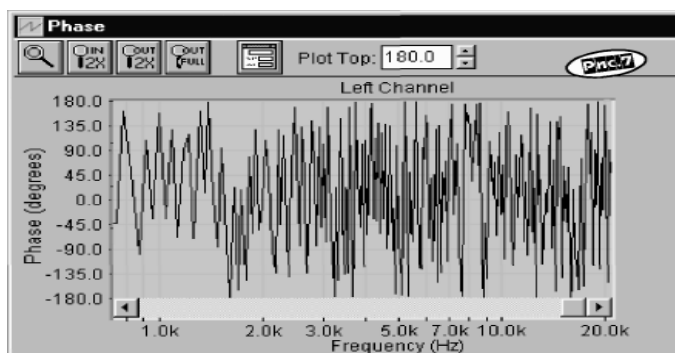


Рис. 3.24.

Кожен формат відображається в окремому вікні, при цьому можна відкрити будь-яку комбінацію вікон з паралельним відображенням процесу в кожному з них. Параметри PlotTop і PlotRange встановлюють верхню межу та діапазон амплітуд під час виведення зображення.

SpectraLAB працює в трьох режимах: RealTime(реальний час), Recorder (те саме із записом) і PostProcess (обробка раніше записаного аудіо). У режимі реального часу вхідний сигнал відразу обробляється і відображається, в режимі запису він записується паралельно в пам'ять або файл на диск з можливістю наступних багаторазових запусків, в режимі обробки сигнал спочатку вводиться з файлу (WAV, WFP і послідовності числових значень зразків у текстовій або двійковій формі). Перегляд головної панелі інструментів (Toolbar) програми в кожному з трьох режимів (рис. 2.25).

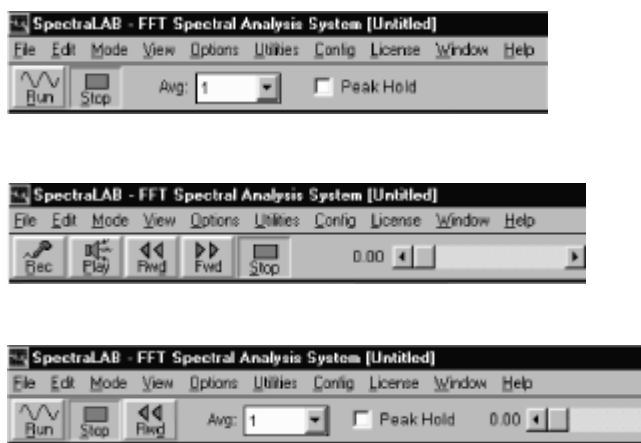


Рис. 3.25.

Параметр Average (усереднення) визначає кількість проходів ШПФ перед кожним вихідним зображенням; результати кількох проходів усереднюються перед висновком. Менші значення параметрів рекомендуються для сигналів, що швидко змінюються, і більші параметри для шумних сигналів.

Пікове утримання включає пікові значення, коли висота кожної спектральної смуги може збільшуватися лише тоді, коли перевищено раніше досягнуте пікове значення. Вікна координат часу доступні в режимах запису та подальшої обробки та дозволяють мишею вибирати область сигналу для подальшого копіювання, вирізання, вставки, фільтрації, відтворення тощо. Для вікон, які не мають цієї координати, доступні лише кнопки масштабування лупи. сітки, діапазони частот для спектральних графіків, частота оновлення зображення, напрямок виводу спектрограми тощо. Крім того, кожне вікно має контекстне меню, яке активується клацанням правою кнопкою миші всередині графічної області та утриманням команд для копіювання вмісту вікна до буфер обміну (у

вигляді оцифровки або серії числових значень у вигляді рядків ASCII), відфільтруйте виділений фрагмент і обчисліть різні значення - потужність сигналу, середній спектр, інтеграл тощо. {1}} Меню "Налаштування" встановлює різноманітні загальні програми налаштування.

Параметри - бітрейт, частота оцифровки, коефіцієнт децимації (децимації), обсяг FFT, тип функції згладжування, кількість каналів і різниця фаз між ними, контроль перевантаження і ступінь перекриття блоків FFT для режиму обробки повідомлення:

Двоканальна обробка пропонує ряд потужних можливостей двоканальної обробки - обчислення крос-спектр, функції передачі та ступінь когерентності (аналог статистичного коефіцієнта кореляції).

Масштабування - тип амплітуди (лінійна/логарифмічна) і частотна осі (лінійна, логарифмічна, октавна або 1/3, 1/6, 1/9, 1/12 або 1/24 октави), а також крива АЧХ мікрофон, завантажений з файлу, або вказано серію пар «частота – рівень», уздовж яких повна крива інтерполюється за допомогою кубічного сплайна.

Тригер є умовою запуску програмного процесора. Містить порогове значення (поріг), його тип (рівень - рівень абсолютного резервування, фронт - стрибок із заданою амплітудою), полярність, зсув часу запуску ЦП від моменту спрацьовування (вперед або назад), канал, у якому діють умови запуску аналізується та перезапускається циклічний режим (Re-Arm). При досягненні умови запуску процесор обробляє певну кількість даних (в реальному часі та після обробки – кожен блок ШПФ, у режимі запису – одну секунду):

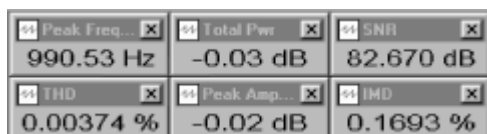
Калібрування (калібрування) - активація програми опорного сигналу з її параметрами.

Маркери – це завдання до шести вибраних частот та/або амплітуд, які будуть окремо вказуватися на графіках – кольором, оцінками на осях чи координатах стрілками замість стовпців на спектрограмі. Їх можна використовувати, наприклад, для виділення значень, які мають особливе значення.

Меню Утиліти дозволяє виконувати ряд додаткових корисних операцій. рожевий шум, синусоїдальні сигнали (1 кГц або набір з десяти сигналів заданих частот і рівнів), переривчасті (послідовні) сигнали, пиловидний, трикутний і прямокутний сигнал, одиничні імпульси, тестові сигнали для розрахунку коефіцієнта інтермодуляції, спотворення і довільні форми W сигналів і довільні форми хвиль. Результат роботи генератора також можна зберегти у файлі WAV.

Крім того, за допомогою утиліт можна відкрити ряд додаткових невеликих вікон (рис. 3.26), відображаючи корисні значення, розраховані за результатами обробки: Peakfrequency - частота пікової складової, Totalpower - сумарна потужність сигналу, сумарне гармонійне спотворення - відсоток гармонійних спотворень (+ шум - разом із шумом), інтермодуляційні спотворення - відсоток інтермодуляційних спотворень, сигнал - відношення шум / відношення сигналу.

Останні чотири режими вимагають синусоїдального сигналу на вході карти; для THD рекомендована частота 1 кГц, для IMD - два тони різної частоти, для SNR частота тону може бути кожен. SNR розраховується як відношення потужності пікової спектральної складової до потужності всіх інших компонентів 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 % |

Рис. 3.26.

При роботі в двоканальному режимі стає доступною функція DelayFind, за допомогою якої можна визначити відносну затримку звуку між каналами. Наприклад, підключивши динамік до виходу, а мікрофон до входу, можна визначити час проходження звуку від динаміка до мікрофона, безпосередньо або після його відбиття від стін стелі кімнати. Потім розраховану затримку можна компенсувати, автоматично вводячи її в параметри процесора за допомогою кнопки Застосувати до затримки обробки.

Нарешті, реєстрація даних дозволяє записувати результати, що відображаються в одному з вікон, у текстовий файл у вигляді рядків, що містять

позначки часу та фактичні числові значення. Подібно до віконного доступу, реєстрація файлу може виконуватися з максимально можливою швидкістю або через певний інтервал, а діапазон частот може бути обмежений.

Безсумнівно, SpectraLAB є найпотужнішою та найуніверсальнішою відомою програмою аналізу спектру.

При записі та вивченні вхідного сигналу звукової карти пам'ятайте, що АЦП передає менше половини частоти дискретизації (ліміт для більшості простих карт – 44,1 або 48 кГц), а на деяких картах частотна характеристика помітно зіпсована вгорі. . тому реальну межу діапазону частот конкретної карти можна визначити лише експериментально.

ВИСНОВОК

Лазерні доплерівські вібраційні датчики найбільш повно реалізують ідею безконтактних вимірювань. Доплерівський зсув частоти випромінювання, розсіяного на рухомих частинках або поверхнях, є одним із давно відомих і добре вивчених явищ. Однак до впровадження лазерних джерел через спектрометричні труднощі можна було вимірювати лише відносно високі швидкості. Все це дає можливість вимірювати менші перерізи розсіювання з великою кутовою роздільною здатністю. Крім того, висока монохроматичність лазерного

випромінювання дозволяє використовувати такі методи обробки світлового сигналу, як детектування гетеродина і вузькосмугова фільтрація.

Доплерівські датчики мають такі переваги: гроші/шум; забезпечують частотне та просторове придушення фону зовнішнього освітлення без використання оптичних фільтрів;

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

мають високу завадостійкість; дозволяють аналізувати вихідний сигнал фотоприймача в діапазоні частот, що перевищує область низькочастотного шуму фотоприймача і лазера. Основними проблемами використання доплерівських датчиків є вимоги до світлопровідного середовища між лазером і поверхнею вимірюваного об'єкта, а також відбивна здатність поверхні об'єкта. 1}} датчики складають досить глибоку фізико-математичну основу методу, а також складність і дорожнечу інструментів.

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 прочност-

ных исследований авиационных двигателей // сб. докладов ВНТК «Метрологическое обеспечение испытаний и измерений в авиационно-космической промышленности». / Ю. А. Ножницкий, Б. А. Балугев. — М. : 2013. С. 76—87.

4. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин — М. : Машиностроение, 2000. — 344 с.
5. Александров А. А. Вибрация и вибродиагностика судового энергетического оборудования / А. А. Александров, А. В. Барков, Н. А. Баркова, В. А. Шаффинский. — Л. : Судостроение, 1986. — 276 с.
6. Коллакот Р. А. Диагностирование механического оборудования / А. Р. Коллакот. — Л. : Судостроение, 1980. — 296 с.
7. Сиротин Н. И. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Н. И. Сиротин, Ю. М. Коровкин. — М. : Машиностроение, 1979. — 277 с.
8. Ушаков А. П. Применение лазерной вибродиагностики в процессе стендовых испытаний агрегатов авиационной техники [Текст] / А.П. Ушаков, А.В. Озеров, А.Ю. Калемениев, П.А. Хабаров // Межвуз. Темат. Сб. научных трудов «Проблемы эксплуатации и совершенствования транспортных систем». — СПб., 2009. — Том XI. — С. 5-15.
9. Журавлев О. А. Лазерная виброметрия механических конструкций: учеб. пособие / О. А. Журавлев и др. — Самара : Изд-во Самара, рос. аэрокосм. ун-та, 2006. — 72 с.
10. Технология лазерного сканирования в съёмке промышленных объектов / .М. : проспект НПП «Навгеоком», 2007.
11. Сосновский А. А. Авиационная радионавигация : справочник / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович. — Москва : Транспорт, 1980. — 219 с.
12. Застрогин Ю.Ф. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования / Ю.Ф. Застрогин, О.Ю. Застрогин, А.З. Кулебякин — М. : Машиностроение, 1995. — 320 с.
13. Петрухин В. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. — М. : Инфра-Инженерия, 2010.

