

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

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускової кафедри

_____ С.В. Павлова

«___» _____ 2021р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Авіаційний лазерний вимірювач вібрації»

Виконавець: Соляник Родіон Олександрович

Керівник: Проф.штат. Землянський Володимир Михайлович

Нормоконтролер:

(підпис)

В.В.Левківський

(п.і.б.)

Київ 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С.В. Павлова

« ____ » _____ 2021р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

Соляник Родіон Олександрович

1. Тема роботи: «Авіаційний лазерний вимірювач вібрації»

затверджена наказом ректора від «22» березня 2021 р. №469/ст

2. Термін виконання роботи: з 17 травня 2021 по 20 червня 2021

3. Вихідні дані роботи:

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1.Вібрація як явище, методи вимірювання вібрації ; Розділ 2.Вібродіагностика ГТД ; Розділ 3. Схема лазерного вимірювача Параметрів

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

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Підбір літератури	17.05.2021	
2.	Підготовка та написання 1 розділу	19.05.2021	
3.	Підготовка та написання 2 розділу	21.05.2021	
4.	Підготовка та написання 3 розділу	24.05.2021	
5.	Перевірка на антиплагіат та отримання рецензії на диплом	09.06.2021	
9.	Підготовка презентації та доповіді	13.06.2021	

7. Дата
видачі
завдання:
" ____ " ____

__ 2021 р.

Керівник
дипломно
ї роботи

Землянсь
кий В.М

Завдання

прийняв до виконання _____ Соляник Р.О

(підпис випускника)

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Лазерний витратомір водневого палива на літальному апараті» : 75 с., 12табл., схеми рисунки, 13 літературних джерела

Об'єкт дослідження: Лазерний вимірювач вібрації

Предмет дослідження: Застосування безконтактних віброметрів у авіації

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

Перелік умовних позначень, скорочень, термінів

Вступ

РОЗДІЛ 1.ВІБРАЦІЯ ЯК ЯВИЩЕ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІ

Класифікація вібрації як явища

Класифікація вимірювальних перетворювачів вібрації

Інерційні методи вимірювання вібрації

Магнітоіндукційні перетворювачі

П'єзоелектричні перетворювачі

РОЗДІЛ 2. ВІБРОДІАГНОСТИКА ГТД

Поняття про вібрації двигуна

Параметри вібрації і одиниці вимірювань

Математичні моделі вібрації

Квазідетермінована вібрація

Квазігармонічного вібрація

Загальні вимоги до вимірювальної системи вібрації

РОЗДІЛ 3 СХЕМА ЛАЗЕРНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ.

Лазер

Принцип дії лазера

Активна речовина лазера

Резонатори

Оптичні датчики

Фотодіоди

Конвертер світло-напруга

Частотний детектор

Інтегратор ЦАП з USB інтерфейсом

Основні положення, що враховуються при конструюванні

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

Для забезпечення безпеки польотів, виявлення дефектів на ранніх стадіях їх виникнення, своєчасного вжиття заходів щодо запобігання поломкам техніки та

авіаційним аваріям, необхідно знати причини деяких дефектів, провести досить точне і надійне вимірювання значень фізичних величин, що визначають стан літального апарату.

Значний вплив на технічний стан авіаційного обладнання, двигуна та літальних апаратів у цілому має вібрація, яка виникає під час експлуатації авіаційних двигунів та пристроїв. Вібрація збільшує навантаження на опори, деталі та вузли, на кріпильні елементи літального апарату, що призводить до підвищеного зносу, зниження міцності та надійності, зменшення ресурсу пристроїв та двигуна, руйнування конструктивних елементів двигуна або літака.

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

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЙ

1.1 Вібрація як явище

Вібрація - механічні вібрації. Вібрація - це механічне коливання машин і механізмів, які характеризуються такими параметрами, як частота, амплітуда, вібраційна ШВИДКІСТЬ, вібраційне прискорення. Вібрація створюється незбалансованими СИЛАМИ, що виникають під час роботи машин та не тільки.

Простою мовою вібрація - це коливання твердих тіл.

Про вібрації також говорять у вужчому ЧУТТІ, маючи на увазі механічні вібрації, які надають відчутний вплив на людину. У цьому випадку ми маємо 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-ї категорії - транспортна вібрація, яка впливає на людину на робочому місці ТРАНСПОРТНИХ СРЕД, що рухається по землі, дорогах тощо.
'Приклад: авіаційні вантажівки

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

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

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

загальна вібрація в житлових приміщеннях та громадських будівлях від внутрішніх джерел. Приклад: ліфти, холодильники. В авіаційній промисловості вібрація реактивних двигунів є щоденною проблемою. Екіпажі з технічного обслуговування, ремонту та капітального ремонту (MRO) у всьому світі повинні контролювати вібрацію двигуна, щоб забезпечити безпеку польоту та ефективне технічне обслуговування. Сила вібрації літака залежить від його 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 літальних апаратів, коли все працює належним чином. .21-.4 IPS є прийнятним, але його також можна виправити за допомогою планового технічного обслуговування. .41-6 IPS трохи шорсткий і зазвичай трапляється в екстремальну погоду або турбулентність на трасі. Однак вібрації літака 1.01-1.2 IPS дуже сильні та небезпечні. Це може спричинити серйозні проблеми, якщо ви не зробите екстрену посадку.

Загальна вібрація газотурбінного двигуна - це сума внесків різних рухомих частин всередині двигуна. Для порівняння кількості вібрації з конкретними компонентами двигуна інженери з технічного обслуговування покладаються на аналіз вібрацій та інструменти балансування обрізки. Вібрації газотурбінного двигуна авіаційного типу можуть бути спричинені низкою причин, основними з яких є:

- джерела вібрації зі швидкістю обертання ротора:

 - дисбаланс роторів;

 - зсув послідовно з'єднаних між собою роторів;

 - кінцеві підшипники підшипників тощо;

- джерела вібрації з частотою, що відрізняється від частоти обертання ротора:

 - нерівномірний потік повітря на вході в двигун;

 - неправильне вирівнювання роторів та їх сполучних шліцевих з'єднань;

 - зачеплення ротора статора;

 - нерівномірне зачеплення передач тощо

1.2 Класифікація вимірювальних перетворювачів вібрації

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

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

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

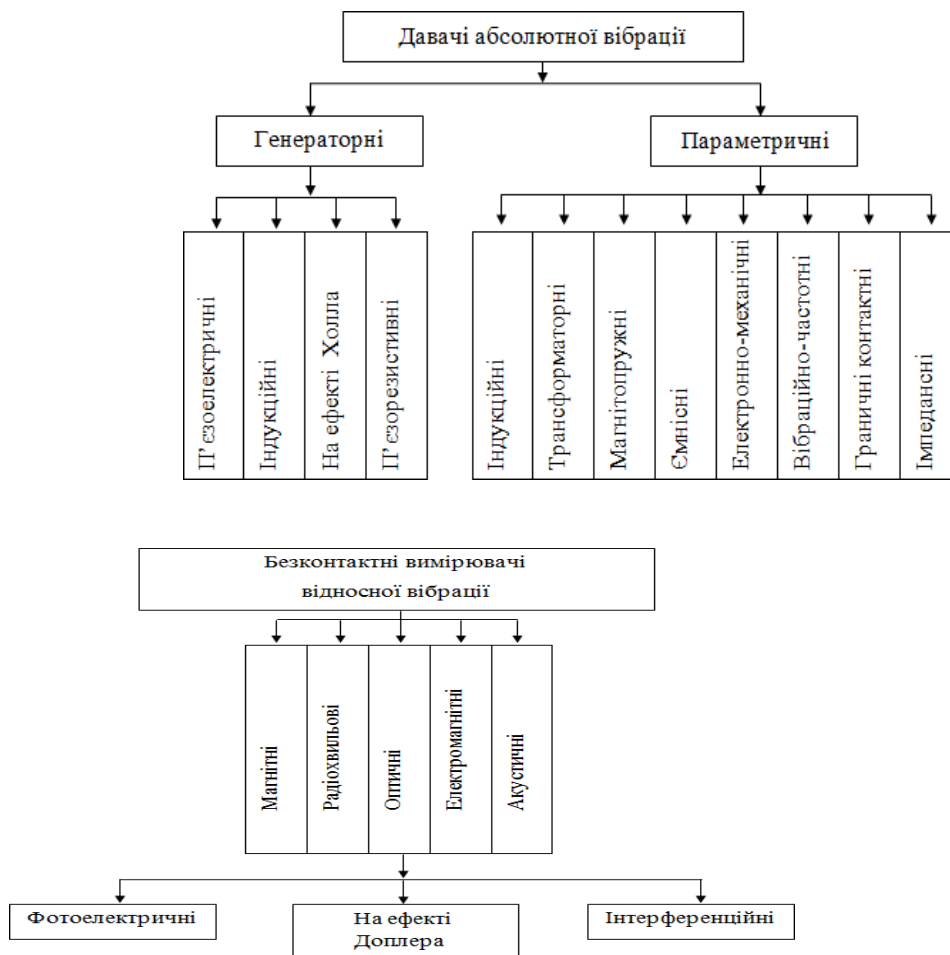


Рисунок 1.2 Класифікація давачів відносної вібрації відповідно до використуванім для перетворення фізичних принципів.

З рис. 1.2 видно, що перетворювачі абсолютної вібрації в електричний сигнал поділяються на два класи: генератор, який перетворює енергію механічних коливань в електричний; параметричні, які перетворюють механічні коливання у вимірювання параметрів електричних ланцюгів, таких як індуктивність, ємність, імпеданс, зсув частоти чи фази тощо.

З абсолютних датчиків вібрації п'єзоелектричні найпоширеніші. Датчики. Вони відрізняються малими розмірами, широкими частотними та динамічними діапазонами, незначними коефіцієнтами 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 зовнішньої сили, включаючи

чергування, деякі кристали або п'єзокераміка генерують 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 яким вони експлуатуються. Коли певне обмеження температури перевищено, п'єзоелемент втрачає частину своєї

поляризації, і коефіцієнт перетворення датчика зменшується. Коли досягається точка Кюрі матеріалу п'єзоелектричного матеріалу, поляризація повністю зникає, а 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 мати мінімальний вплив на вібруючий об'єкт. Резонансна частота об'єкта змінюється під впливом маси датчика.

У безконтактних лічильниках найбільш широко використовуються у вібраційній діагностиці оптичні методи та засоби вимірювання параметрів вібрації, які поділяються на амплітуду та частоту. До методів вимірювання амплітуди належать

фотоелектричні (або фотомодуляційні) та методи вимірювання перешкод.

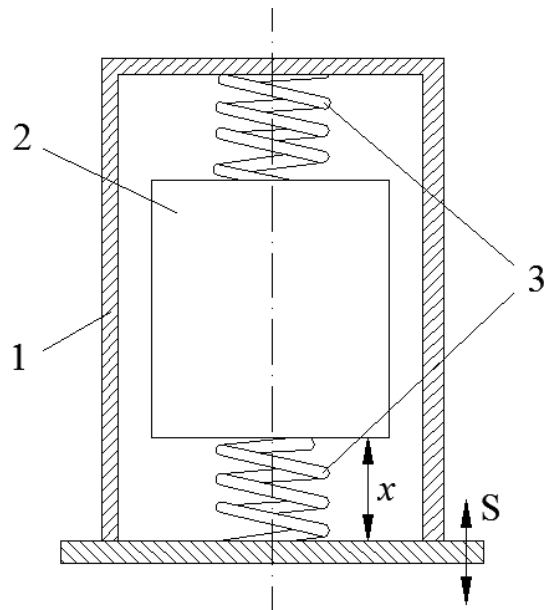
Вимірювання параметрів вібрації на основі змін частоти випромінювання, відбитого від об'єкта, здійснюється за допомогою вимірювальних приладів на основі ефекту Доплера

1.3 Інерційні методи вимірювання вібрації

Вібрацію об'єкта можна визначити, спостерігаючи за його положенням щодо інших об'єктів, які вважаються нерухомими. Існують абсолютні та інерційні

методи вимірювання вібрації залежно від об'єкта, для якого проводяться вимірювання.

При вимірюванні вібрації за абсолютним методом вібрація спостерігається щодо світового простору (зірок). В авіації цей метод дуже важко застосувати, оскільки рух літака відносно світу в рази більший за вібрацію.



Інерційний метод вимірювання вібрації авіаційних двигунів знайшов широке застосування. Цей метод заснований на першому законі Ньютона - властивості тіла підтримувати стан спокою, коли на нього не впливають сили.

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

Метод вимірювання (рис. 1.3) складається з корпусу 1 (вібраційний елемент), жорстко з'єднаного з двигуном літака, та інерційної маси 2 (невібруючого елемента), з'єднаного з корпусом 1 пружинами 3. Таким чином, коли двигун вібрує, корпус 1 ВВП рухатиметься, а інерційна маса 2 завдяки своїй інерції залишатиметься відносно нерухомою. Отже, ВВП перетворює вхідний сигнал - коливальне переміщення S корпусу 1 (і, отже, авіаційного двигуна) щодо простору, у вихідний сигнал - рух x ВВП корпусу відносно інерційної маси 2 (сейсмічна маса). Рух такої коливальної системи описується виразом $\ddot{x} = 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -\ddot{S}$, де $\beta = \frac{\delta}{2\sqrt{cm}}$ коефіцієнт відносного загасання; δ — коефіцієнт демпфірування, $\frac{\delta}{2\sqrt{cm}}$ кг/с.

$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{m}}$ власна кругова частота, 1/с; C — жорсткість пружин, Н/м;
 m — маса невібруючого елемента, кг.

Коефіцієнт передачі такої системи описується виразом:

$$\eta = \frac{\gamma^2}{1 - \gamma^2 + j^2 \beta \gamma^3}$$

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

На рис 1.4 показана АЧХ ВВП з різним коефіцієнтом загасання

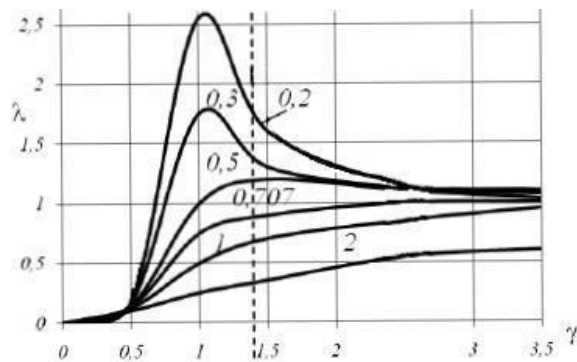


Рисунок 1.4 — АЧХ ВВП з різним коефіцієнтом загасання

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

— перетворення віброшвидкості. Для забезпечення $\gamma > 1,5$ необхідно застосовувати пружини малої жорсткості, а для $\gamma < 0,5$ — великої жорсткості. Виготовлення ВВП з $0,5 < \gamma < 1,5$ досить важко, тому зазвичай створюють ВВП або з $\gamma < 0,5$ або з $\gamma > 1,5$.

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

1.4 Магнітоіндукційні перетворювачі

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

Його структурна схема зображена на рис. 1.5.

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

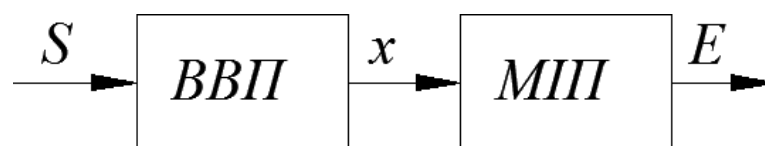


Рисунок 1.5 — Структурна схема давача вібрації з МІП

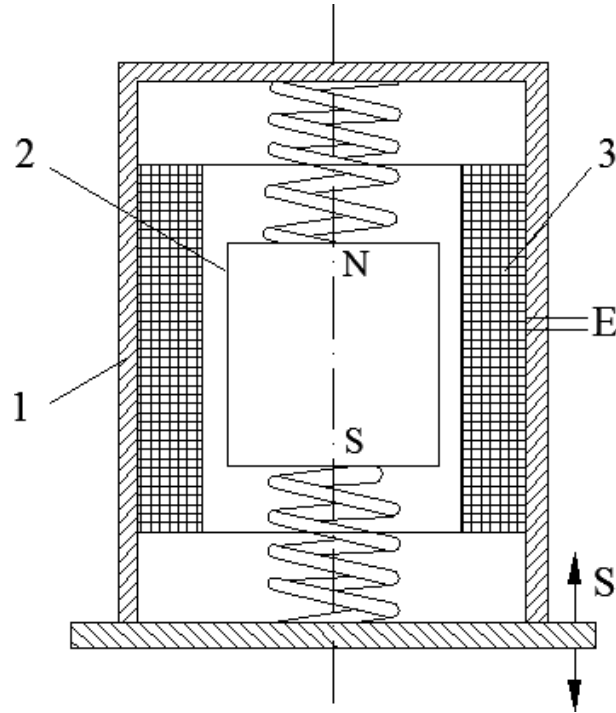


Рисунок 1.6 Конструкція давача вібрації з МІП

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

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

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

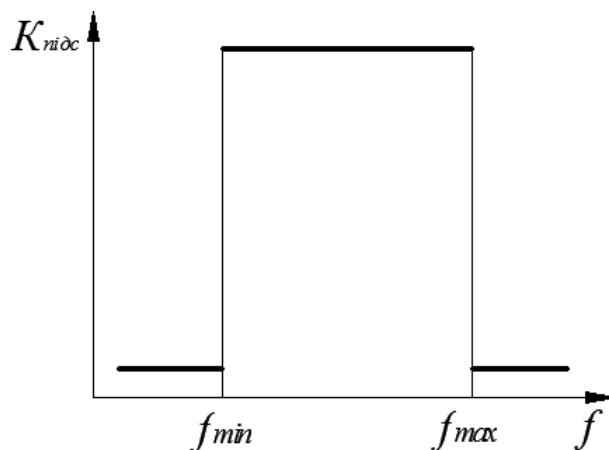
де K — коефіцієнт пропорційності — чутливість давача, мВ

Отже, для отримання інформації про віброшвидкість в віброметрах з МІП необхідно вимірювати ЕРС змінного струму. ЕРС на виході МІП має мале значення, тому її необхідно посилити. Однак при передачі ЕРС від МІП до

входу підсилювача на дроти впливають електромагнітні та електростатичні поля, які викликають в дротах інші ЕРС, так звані

наведення, які мають частоти відмінні від частоти вібрації. У той же час

вібрація двигуна може відбуватися з різними частотами. Тому, щоб посилювати ЕРС тільки необхідні частоти (першої роторної гармоніки), підсилювачі віброметрів швидкості з МІП повинні мати постійний коефіцієнт передачі (підсилення) в усьому діапазоні частот ЕРС (від до). АЧХ такого підсилювача (залежність коефіцієнта



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

Рисунок 1.7 Ідеальний вигляд АЧХ підсилювача віброметра швидкості. Для отримання бажаної АЧХ підсилювача віброметра швидкості, струк-

турна схема якого показана на рис. 1.8, після вхідного каскаду посилення ВК, узгоджувального великий вихідний опір МІП з низьким вхідним опором наступних каскадів, включають послідовно інтегруючий і диференціюючий RC-ланцюжок, а потім два виборчих каскади посилення.

Інтегруючий ІЛ і диференціюючий ДЛ ланцюжки забезпечують затухання на частотах відповідно $f > f_c$ і $f < f_c$.

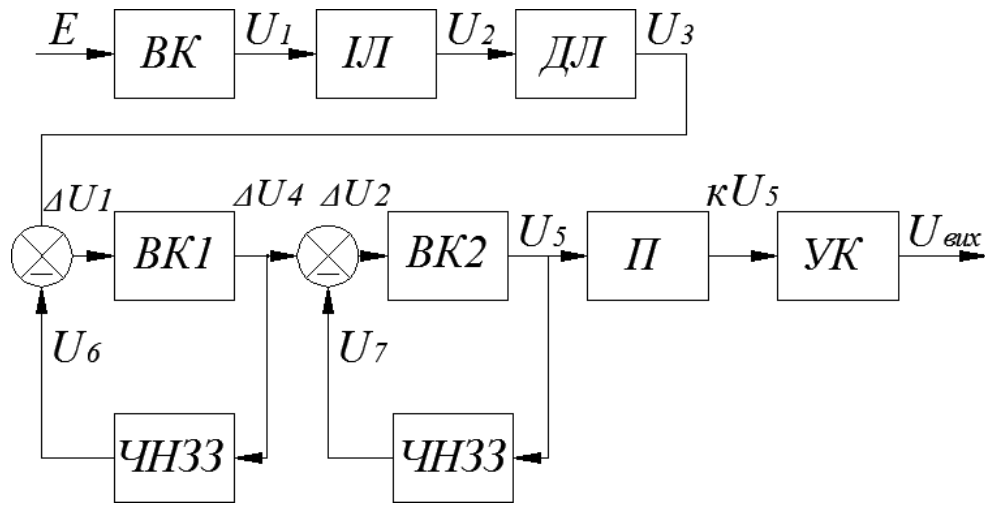


Рисунок 1.8 — Структурна схема підсилювача віброметра швидкості

Перший виборчий каскад ВК1 за рахунок частотозалежного негативного зворотного зв'язку ЧНЗЗ має АЧХ, показану на рис. 1.9 кривою 2. Він посилює ЕРС з частотами вище..... Другий виборчий каскад ВК2, має АЧХ, показану кривої 1. Цей каскад підсилює ЕРС з частотами нижче..... В результаті такого включення RC-ланцюжків і виборчих підсилювачів отримують АЧХ підсилювача (крива 3), близьку до ідеальної (рис. 1.7).

Рисунок 1.9 — Дійсна АЧХ підсилювача віброметра швидкості

Для отримання необхідного значення коефіцієнта підсилювача після другого виборчого підсилювача підсилюють невиборчий каскад підсилення П (рис. 1.8). Вихід цього каскаду з'єднують зі входом узгоджувального каскаду УК, що відповідає високому вихідному опору підсилювача з низьким вхідним опором наступних пристроїв. Вимірювачі швидкості вібрації з МІР застосовуються на всіх літаках з турбореактивними або турбовентиляторними

двигунами.

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

Однак прискорювач віброметра для ТВД повинен підсилювати ЕРС лише на одній частоті і може мати коефіцієнт посилення, відмінний від коефіцієнта посилення віброметра швидкості. Враховуючи, що майже в TVD швидкість може незначно змінитися і що неможливо створити кілька TVD з абсолютно однаковою швидкістю вала гвинта, підсилювач віброметра з прискоренням МІР повинен мати смугу частот, але дуже вузьку: 5-10 Гц

Для отримання необхідної форми АЧХ прискорювача віброметра прискорення на вході підсилювача встановлюють подвійний Т-подібний RC-фільтр, що входить до схеми негативного зворотного зв'язку підсилювача Р і збігу УФ-каскадів (Рис. 1.10), який встановлений таким чином, щоб на робочій частоті не було негативного зв'язку і коефіцієнт підсилення був максимальним.

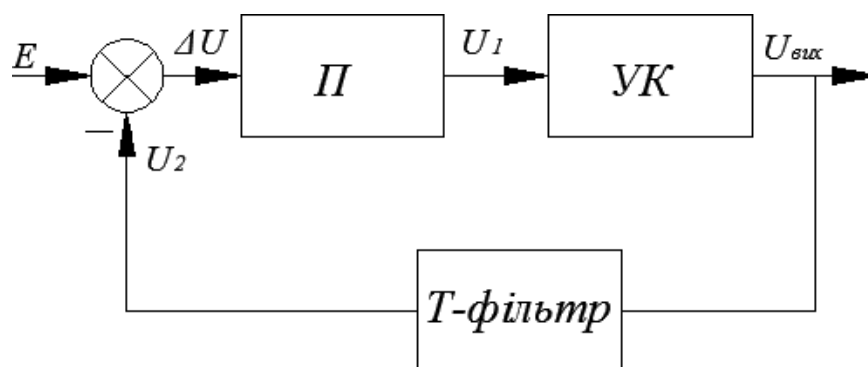


Рисунок 1.10 — Схема включення Т-фільтра

АЧХ підсилювача віброметра прискорення з МІП показана на рис.

1.11. Для отримання інформації про вібропереміщення інтегрують сигнал з

виходу підсилювача віброметра швидкості.

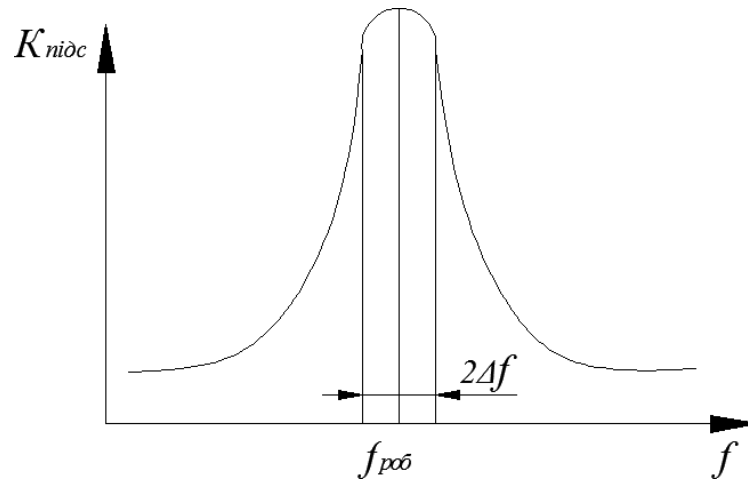


Рисунок 1.11 — АЧХ підсилювача віброметра прискорення з МІП

1.5 П'єзоелектричні перетворювачі

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

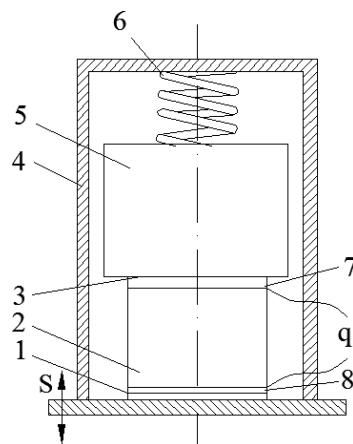


Рисунок 1.12 — Давач вібрації з ПЕП

У такому давачі ПЕП 2 через ізолятор 1 жорстко кріпиться до корпусу 4 давача, невібруючий елемент 5 також через ізолятор 3 з'єднується з ПЕП. При

вібрації давача за рахунок інерції невібруючого елемента виникає сила

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

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

співвідношенням

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

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

РОЗДІЛ 2. ВІБРОДІАГНОСТИКА ГТД

1.1 Поняття про вібрації двигуна

Газотурбінні двигуни (ГТД) широко використовуються в різних галузях: в авіації, енергетиці, суднобудуванні, на транспорті. У зв'язку з цим важливість усіх техніко-економічних характеристик, що визначають якість двигуна. Особливі вимоги ставляться до надійності та ресурсу як основних факторів підвищення економічної ефективності газотурбінних двигунів. Надійність та термін служби багато в чому визначаються рівнем вібраційної напруги двигунів.

Прагнення поліпшити роботу двигуна призводить до збільшення частоти обертання, збільшення енергії, ускладнення робочих процесів та структурних ланцюгів двигунів (багатоступеневих компресорів, двоконтурних ланцюгів, форсажних пальників) до використання легких і тонкостінних конструктивні елементи. В результаті характер вібрації ускладнюється, а вібраційні навантаження на деталі двигуна збільшуються, тобто інтенсивність та небезпека вібрації збільшується.

Контроль вібрації стає невід'ємною частиною забезпечення високої якості двигунів. Воно проводиться на етапах проектування, переробки, серійного виробництва та експлуатації двигунів. Контроль вібрацій вимагає вмілого поєднання обчислювальних та експериментальних методів. Складність вібраційних явищ при ВМД визначає домінуюче положення експерименту. Постановка вібраційного експерименту та оцінка його результатів складним завданням дослідження. Обсяг вимірювальної інформації різко збільшується. Донедавна вимірювання вібрації газотурбінного двигуна носили епізодичний характер і мали переважно пізнавальний характер. В даний час характерною рисою віброметрії маса досліджень. Ще однією характерною особливістю розробка функцій для швидкої оцінки загального вібраційного стану двигуна. Контроль вібрацій силових кожухів перетворюється на технологічну операцію, що виконується безперервно під час усіх видів випробувань та роботи двигуна. Кількість контрольованих компонентів двигуна збільшується, алгоритми обробки вимірювальної інформації ускладнюються. Вібрація двигуна це реакція на дію обурливих сил. Зазвичай на двигун впливає кілька різних сил одночасно. Величина та характер реакції двигуна залежать від збурюючих сил (їх кількості, величини, характеру, місця розташування та способу застосування) та від властивостей двигуна як коливальної системи.

Припустимо, що двигун може бути представлений у вигляді абсолютно твердого корпусу, встановленого на амортизаторах і збудженого силою. Така коливальна система має шість ступенів свободи і може виконувати лінійні та кутові (обертальні) коливання. При відповідному виборі системи координат її рух описується трьома лінійними та трьома кутовими або шістьма лінійними координатами. Вібрацію такого двигуна можна виміряти шістьма однокомпонентними датчиками, кожен з яких вимірює вібрацію на одній з координатних осей. Розглядаючи двигун як лінійну систему, цю схему вимірювання можна поширити на вплив сили довільного типу та на дію

декількох довільних сил. свобода. Вичерпне вивчення його коливань неможливо ні аналітично, ні експериментально. В останньому випадку двигун повинен був би встановлюватися на нескінченно велику кількість датчиків, рівну кількості його ступенів свободи. Практично прагніть отримати приблизне рішення цієї проблеми. Двигун представлений у вигляді якоїсь ідеалізованої коливальної системи з мінімальною кількістю ступенів свободи, але зі збереженням основних коливальних властивостей реального двигуна. Деякі компоненти двигуна подаються як маси, нехтуючи їх пружними властивостями, інші враховують лише пружність, нехтуючи масами. Наприклад, на рис. На рис. 1 двоопорний двигун показаний у вигляді силового корпусу, що складається з двох основних мас і жорстко з'єднаний між собою невагомими елементами. Неенергетичні елементи (агрегати, пристрої) представлені у вигляді маси, еластично або жорстко з'єднані з силовим корпусом. Згідно з цією схемою вібрація силового тіла збуджується жорстким неврівноваженим ротором, а вібрація несилового елемента вібрацією тіла 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).

З цими пропозиціями,

За цих пропозицій вібрація силового кузова характеризує загальний вібраційний стан двигуна -

це ступінь дисбалансу ротора і ступінь збудження вібрації несилкових елементів. Це також дає оцінити загальну вібраційну енергію двигуна і ступінь залежності двигуна і об'єкт. Оскільки кінетична енергія прямо пропорційна масі та квадрату швидкості вібрації, загальна вібраційна енергія зосереджена головним чином в основних масах двигуна, і вібрація силового тіла є її визначальною характеристикою. Відповідно вібрацію силового корпусу можна назвати сумарною вібрацією

ю двигуна. Загальна вібрація часто означає лише лінійну вібрацію, оскільки кутові коливання не характерні для ГТД.

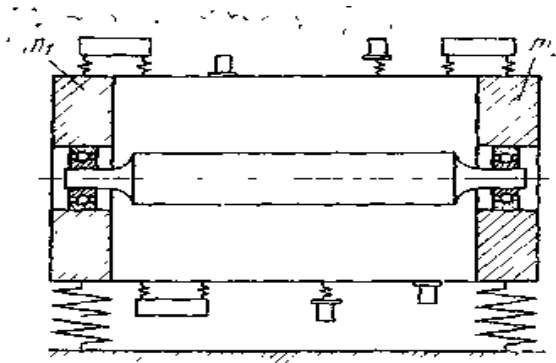


Рис. 1. 10. Простейшая схема двигателя как колебательной системы

Найпростіша схема двигуна як коливальні системи.

При вивченні вібрації використовуються різні схеми двигуна. Найпростіша схема більш-менш задовільна лише на низьких частотах коливань (десятки Гц), де ви все ще можете вважати корпус і ротор двигуна жорсткими. На середніх частотах (сотні Гц) гнучкістю корпусу та ротора, як правило, не можна нехтувати і вимагає більш складної конструктивної схеми коливань. На високих частотах (тисячі Гц) досить складно зробити задовільний контур. Зі збільшенням частоти вібрацій вибір стандартних точок також ускладнюється, а інтерпретація результатів вимірювань ускладнюється.

Вібрація, як правило, класифікується за своєю природою, за фізичною сутністю її явищ. Таким чином, існують вібрації механічного, аеро- та гідродинамічного, акустичного походження тощо. Найбільш поширена класифікація вібрацій за структурними компонентами двигуна, що збуджує цей тип вібрації. Розрізняють "поворотні", "кручені", "леза", "зуби", "підшипники" тощо вібраційні. Порядок вібраційної гармоніки визначається по відношенню до частоти вібрації до числа обертів джерела:

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

а не до частоти більш низькочастотної складової, як це прийнято в гармонійно му аналізі. Отже, існують «іменовані» гармоніки: 1-я гармоніка ротора, 4-а гармоніка гвинта і т.д. Термін «гармоніка» означає те, що ця частотна складов а вібрації належить певного джерела і не має на увазі суворої гармонії.

Таким чином, коливання із змінною амплітудою з дискретної частотою, рівній чотирикратної швидкості обертання повітряного гвинта, називається 4-ю гармонікою повітряного гвинта.

Вібрація як процес, що протікає в часі, описується відповідним законом коливань і ха рактеризується певними параметрами цього закону. Гармонічна вібрація описується т рьома незалежними параметрами: амплітудою, частотою та початковою фазою. Часто та вібрації вимірюється в Гц, а пов'язаний з цим період коливань і кутова частота вим ірюються відповідно в с та рад / с. Фаза вимірюється в радіанах або кутових градусах (1рад = 57,295 °).

Одиниці виміру амплітуди вібрації залежать від вимірюваного значення вібраціїЗ міщення вібрації вимірюються у м, швидкості у м / с, прискорення у м / с². Поширен а практична система одиниць: переміщення вимірюються в міліметрах, швидкості в мм / с, прискорення в одиницях нормованого прискорення сили тяжіння(1g = 9,807 м/с²).

Зв'язок амплітуд прискорення в практичній та міжнародній системах виражаєт ься формулою:

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

Іноді використовують безрозмірний коефіцієнт, який дорівнює відношенню пр искорення вібрації до прискорення сили тяжіння:

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

Цей параметр називається коефіцієнтом перевантаження вібрації. Чисельно во но збігається зі значенням прискорення, вираженим у.

Пікове значення вібрації визначається як найбільше відхилення значення вібрації в тому чи іншому напрямку від нульового рівня:

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

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

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

має певний фізичний зміст у випадках швидкості вібрації, оскільки енергія вібрації, як правило, 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 форм-фактором:

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

, а пік до ефективного значення - амплітудою фактора або коефіцієнтом гребеня:

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

У випадках гармонійних вібрацій

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

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

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

Ефективне значення швидкості вібрації приймається як початковий рівень інтенсивності вібрації. Вимірним параметром шуму є звуковий тиск.

1.2 Математичні моделі вібрації

При вирішенні вібраційних задач використовуються різні математичні моделі реальних вібрацій.

Більшість моделей основних компонентів вібрації базуються на їх поданні як вузькосмуговий процес із повільною амплітудою та фазою, що змінюється в часі.

Моделювання широкосмугової вібрації базується на її поданні у вигляді лінійної суперпозиції основних компонентів та вібраційних шумів. Давайте розглянемо кілька можливих моделей вібрації ГТЕ.

1.3 Квазідетермінована вібрація

Така вібрація є виродженим випадковим процесом, реалізація якого описується функціями часу певного типу, що містять один або кілька випадкових параметрів, які не залежать від часу. Нехай реалізації окремих компонентів вібрації представляють гармонійну 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 розподілена рівномірно за період:

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

Кореляційна функція вібрації (11) - це 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.

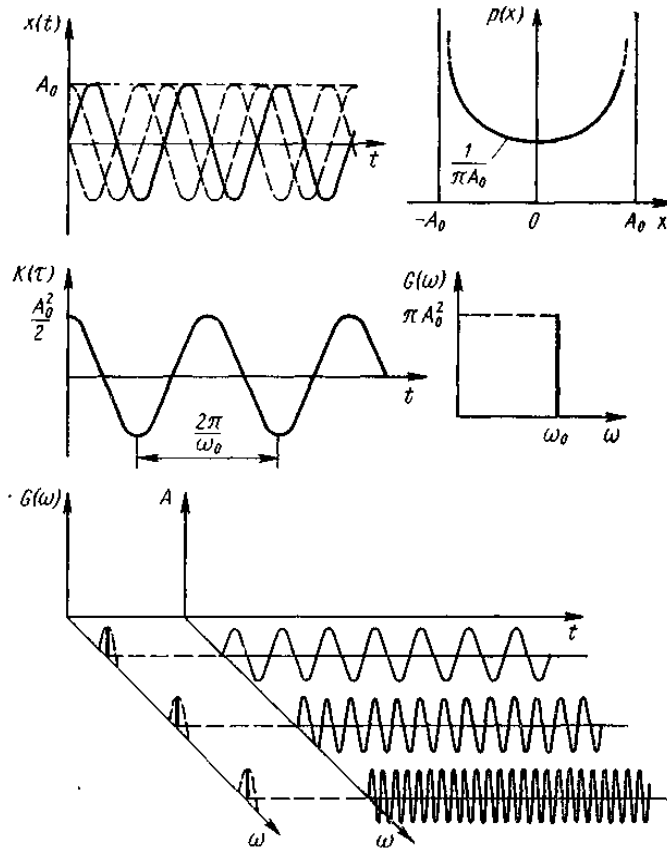


Рис. 1.49 Характеристики квазидетерминированной вибрации

84

Рис. 4 Характеристика квазидетерминованої вібрації.

Широкосмугова квазидетермінована вібрація може містити кілька гармонічних 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 показані в нижній частині рис. 4. Штриховою лінією на графіку показана частотна характеристика фільтра, що розділяє компоненти, та тип компонентів на виході фільтра. Реалізації компонентів квазидетермінованої вібрації можуть також відрізнятися частотами або амплітудами. В останньому випадку, наприклад, одновимірна щільність 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 .Квазігармонічна вібрація

Окремі компоненти загальної вібрації представляють вузькосмугову вібрацію і за формою нагадують модульовану гармонійну вібрацію, тому їх називають квазігармонічними. Квазігармонічна вібрація виникає, наприклад, коли до коливальної системи з одним ступенем свободи із слабким демпфіруванням застосовується широкосмугова випадкова вібрація. Якщо збуджуюча широкосмугова вібрація нерухома і нормальна, тоді квазігармонічна вібрація динамічної системи також буде нерухомою і нормальною.

Спектральна щільність квазігармонійної вібрації зосереджена навколо власної частоти ω_1 :

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

, 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.

Одновимірна щільність ймовірності нормальної квазігармонічної вібрації 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:

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

Одновимірною щільністю ймовірності оболонки описується розподілом Релея:

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

Середнє значення обвідної:

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

Середньоквадратичне значення:

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

Середньоквадратичне відхилення обвідної:

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

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 огинає квазігармонічного вібрації не підкоряється закону Релея, то така вібрація ненормально.

Спектрально-тимчасові характеристики її показані на рис. 5.

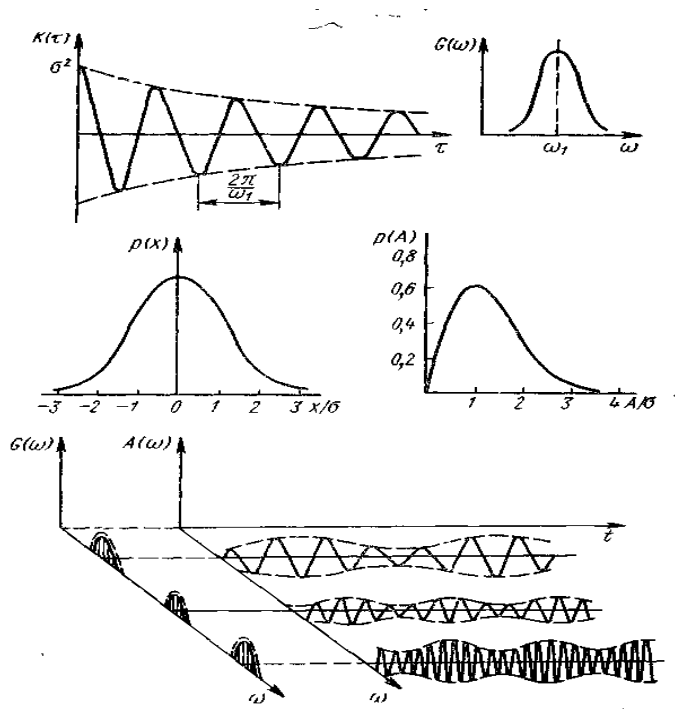


Рис. 1.50. Характеристики нормальной квазигармонической вибрации

Рис. 5. Характеристики нормальной квазигармонической вибрации.

3.3 Модель III. Сума квазідетермінованої вібрації і вібраційного шуму

Складові вібрації представляються у вигляді:

$$x(t) = s(t) + n(t), \tag{28}$$

де визначається по (11), а - стаціонарний нормальний шум з нульовим середнім значенням і середньквдратическим значенням. Якщо гармонійна складова і шум статистично незалежні і комбінуються адитивно, то щільність ймовірності сумарної вібрації (28) визначається виразом (рис. 6):

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

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

Цей результат поширюється на випадок, коли гармонійна складова має фіксовану фазу. На рис. 6 показані характеристики суми гармонійної вібрації і нормального шуму.

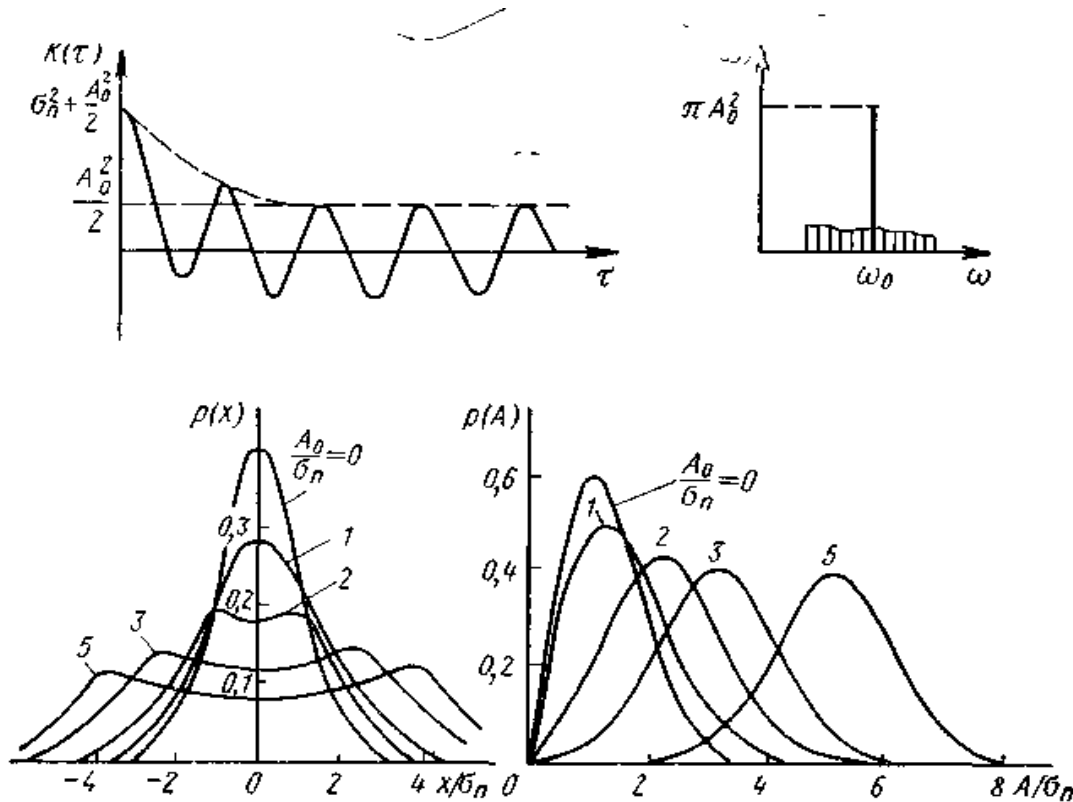


Рис 1.51. Характеристики суми гармонической вибрации и нормального шума

Мал. 6. Характеристики суми гармонійної вібрації і нормального шуму.

Внаслідок статистичної незалежності кореляційна функція і спектральна щільність сумарною вібрації рівні кореляційним функціям і спектральним щільностям 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 від уявного аргументу.

Якщо гармонійна складова відсутня, то розподіл Райса переходить в розподіл Релея (22). Якщо енергія шуму мала в порівнянні з енергією гармонійної складової, то розподіл Райса наближається до розподілу Гаусса з параметрами:

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

Широкополосная вибращія может содержать нескольких составляющих:

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

2.5 Амплитудно-модулированная вибращія

Окремий компонент вибращії має вигляд:

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

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

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

Спектральна щільність визначається за допомогою кореляційної функції і має вигляд дискретної лінії на частоті та симетричних сторонах смуги (рис. 7).

Ширококутні вибращії можуть включати кілька амплітудно-модульованих коливань:

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

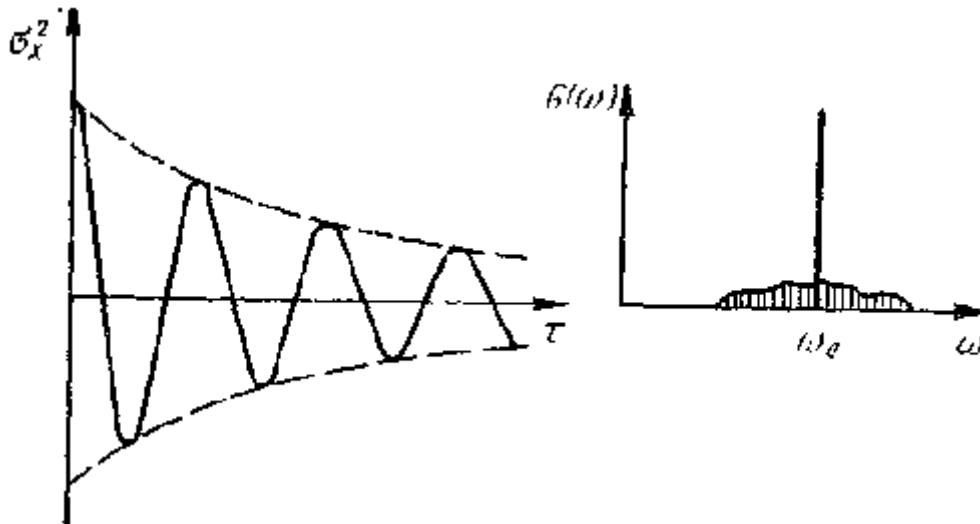


Рис. 7. Характеристика амплітудно-модульованої вібрації.

Наведені вище моделі не вичерпують усіх можливостей, особливо при імітації широкосмугової вібрації. Іноді може знадобитися використовувати кілька типів вузькосмугових вібраційних моделей при складанні широкосмугової вібраційної моделі.

2.6 Загальні вимоги до системи вимірювання вібрації

Віброграма (рис. 8) містить кілька записів вібрації в різних точках досліджуваної системи та записи допоміжних параметрів (частота обертання двигуна, позначки часу тощо), тому вимірювальна система повинна бути багатоканальною. Вимога щодо відстані впливає з умов праці. Відстань від датчиків до вимірювальної системи може становити десятки і 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 вимірних значень амплітуд вібрації - від мінімальної до максимальної X_{\max} :

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

де ρ_0 - чутливість каналу у вимірній частоті діапазон.

Відповідно до типових спектрів, загальний діапазон частот обладнання для вимірювання вібрації можна прийняти рівним $10 - 10000 \text{ Гц}$, оскільки інтенсивність вібраційних компонентів з частотами поза цим діапазоном зазвичай невелика.

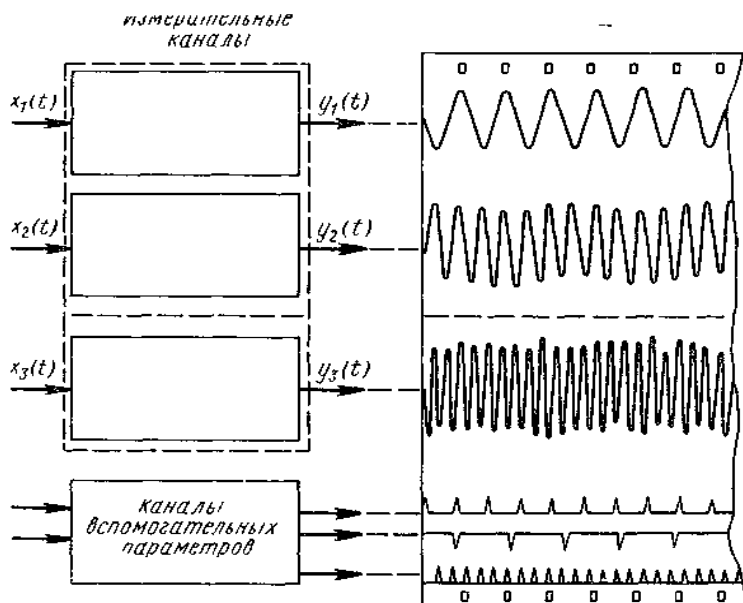


Рис. 2.1. Структура измерительной системы

Рис. 8. Структура вимірювальної системи

Для реєстрації параметрів вібрації вимірювальний канал повинен містити ряд пристроїв.

Кожен вимірювальний канал включає кілька функціональних пристроїв (елементів, ланок), зазвичай з'єднаних послідовно. Датчик D перетворює механічні коливання в електричні. Перетворювач електричного сигналу Pr здійснює різні лінійні перетворення (фільтрування, інтегрування, диференціація). Лінійний підсилювач забезпечує посилення сигналу до значення, необхідного для реєстрації. Рекордер R забезпечує індикацію та запис вібрації на магнітній стрічці. В останньому випадку наявність фільтра не є необхідною.

Точність вимірювання амплітуд не є особливо суворою, оскільки головним інтересом є якісна картина вібрації (її структура, природа, джерело). Допустимі похибки становлять 10-20%. Точність частотних (іноді фазових) вимірювань повинна бути високою (1-2%). Ці параметри часто є визначальними при розкритті фізичної сутності вібрації.

РОЗДІЛ 3

СХЕМА ЛАЗЕРНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ

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

Принцип дії лазерних систем вимірювання параметрів механічних коливань заснований на ефекті Доплера зміни частоти

світлового випромінювання при відносному русі приймача і джерела випромінювання. Доплерівське зміна частоти відбитого від об'єкта вимірювання світлового випромінювання $\omega_d = 2\omega V_r / c$, де ω - кругова частота світлового випромінювання; швидкість об'єкта;

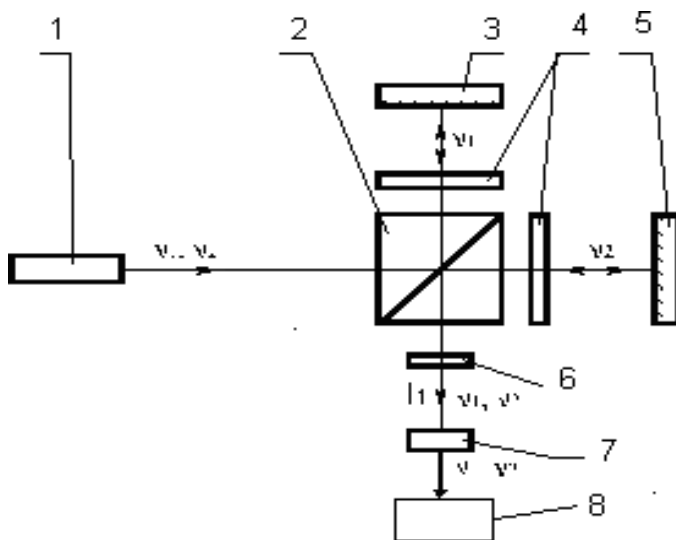
З одночастотних лазерних вимірювальних систем з частотною модуляцією

найбільш поширений двопробеневий інтерферометр або інтерферометр Майкельсона.

У цьому інтерферометрі на приймач надсилаються дві електромагнітні хвилі:

- розсіяні, що містять доплеровській зрушення 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 перпендикулярна площині малювання. Поляризаційний куб-призма 2 розділяє компоненти випромінювання різних частот і направляє їх в різні плечі інтерферометра.

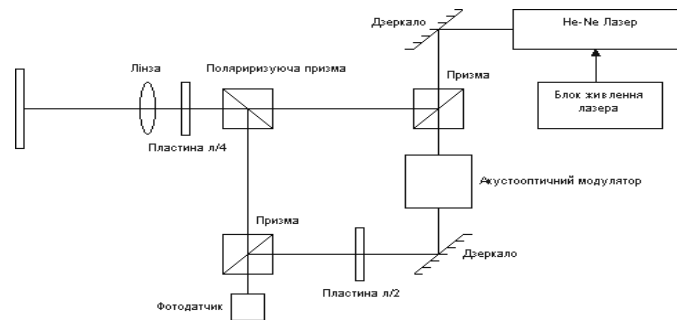


Мал. 3.1.

Пластина $\lambda/4$ - позиція 4 змінюють стан поляризації пучків на ортогональне.

Поляризуючий куб призми 2 забезпечує суперпозицію пучків, повернутих відбивачами 3 і 5 у напрямку I1. Після поляризаторів 6 в результаті перешкод променів з різними частотами формуються основні вимірювальні сигнали I1 биття.

випромінювання акустооптичними модуляторами (рис. 3.2), встановленими на вході, виході або в одному з плечей інтерферометра. У цьому випадку опорний сигнал може бути отриманий безпосередньо з сигналів, що подаються на акустооптичні модулятори.



Мал. 3.2.

частота модуляції частоти обмежує час вимірювання. Однак при використанні акустооптичних модуляторів він може бути досить великим, щоб цим обмеженням можна було ігнорувати. Тоді час однофазного вимірювання визначається часом затримки пристрою для вимірювання фази і становить для сучасних локальних мереж близько 10 мкс.

Оскільки локальні мережі, засновані на частотній модуляції, забезпечують час вимірювання на порядок менше, ніж локальні мережі, засновані на фазовій модуляції, допустимі швидкості зміни ГС в них на порядок вище. Ці локальні мережі вважаються більш придатними для високоточних вимірювань у режимі реального часу. З тією ж помилкою вони мають трохи більший діапазон вимірювання ГХ.

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

$$I(t) = I_1 + I_2 + I_1 \cdot \cos(4\pi \cdot \nu_1 \cdot t + \phi_1) + I_2 \cdot \cos(4\pi \cdot \nu_2 \cdot t + \phi_2) +$$

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

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

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

Особливість сигналу биття в тім, що навіть під час відсутності зміни ГРХ між інтерферуючими хвилями інтенсивність змінюється по гармонійному закону. Якщо одна з інтерферуючих хвиль проходить додатковий геометричний шлях $2L$, то сигнал биття одержує додаткове фазове зрушення $\phi = 4\pi L / \lambda$, еквівалентне фази

немодульованого інтерференційного сигналу на довжині хвилі λ при ГРХ інтерферуючих променів, рівної $2L$.

Щоб визначити ГРХ, вимірюють фазове зрушення

$$\phi(t) = 2\pi t \cdot \nu_b$$

між опорним і вимірювальним сигналами биття:

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

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

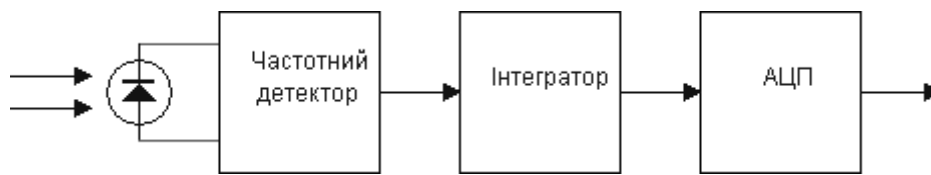
де A_0 и A_1 - їхні амплітуди.

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

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 фотодетектора, що дорівнює різниці між частотами опорного та вимірювального оптичних сигналів, дозволяє проводити аналіз вихідного сигналу в діапазоні частот вище низькочастотного шуму фотодетектора і лазер. високі швидкості, частота і довільний закон змін у часі.

Ви можете використовувати персональний комп'ютер для аналізу параметрів вібрації, але сигнал від фотодатчика спочатку повинен бути перетворений у сигнали, які будуть оброблятися безпосередньо в ПК.

На малюнку 3.3. показана блок-схема такого перетворювача. Сигнал від фотодатчика надходить на детектор частоти, який перетворює зміну частоти в електричний сигнал, пропорційний зміні швидкості вібрації. На виході інтегратора електричний сигнал вже пропорційний фактичному коливанню об'єкта. Цей сигнал надходить у перетворювач напруги в цифровий сигнал, який надходить на вхід персонального комп'ютера.



Мал. 3.3.

3.1.Лазер

Лазери - це джерела когерентного оптичного випромінювання (оптичне випромінювання є когерентним, якщо його амплітуда, частота, фаза, напрямок поширення та поляризація постійні або змінюються, але не хаотично, а впорядковано, згідно з певним законом), принцип яких заснований про використання індукованого випромінювання.

Слово «лазер» - це абревіатура англійської фрази «Підсилення світла за рахунок стимульованого випромінювання», що перекладається як посилення світла в результаті вимушеного випромінювання. Пристрій, що генерує електромагнітні коливання, засноване на використанні явища індукованого випромінювання в мікрохвильовому діапазоні, було створено в 1953-1954 рр. Н. Г. Басовим та А. М. Прохоровим в СРСР та групою "Таунс" у США.

3.1.1.Принцип дії лазера

Енергія атома і молекули квантована, тобто енергія не змінюється постійно, а приймає лише певні значення. Рівні енергії відповідають цим енергетичним значенням. Перехід атома або молекули з одного енергетичного рівня на інший є стрибком. При цьому відповідна порція випромінювання - квант світла, або, інакше, фотон поглинається або, навпаки, випускається. Коли атом переходить на вищий

енергетичний рівень, фотон поглинається; при переході одного і того ж атома на нижній рівень виникає фотонне випромінювання. Енергія поглиненого або випромінюваного фотона дорівнює різниці енергій між рівнями атома, між якими відбувається перехід. Енергія фотона дорівнює $h\nu$, де ν - частота випромінювання, h - постійна Планка ($h = 6,6 \times 10^{-34}$ Дж с).

При взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною збільшення енергії поля відбувається за рахунок спонтанного та індукованого випромінювання, а зменшення - за рахунок поглинання електромагнітного випромінювання. Всі три явища є випадковими і описуються статистичними закономірностями. Ймовірності наведеного випромінювання та поглинання пропорційні густині енергії електромагнітного випромінювання, що взаємодіє з речовиною. Індуковане випромінювання виникає під впливом електромагнітного поля під час переходу частинки (атома або молекули) з верхнього енергетичного рівня на нижній. Індуковане випромінювання збігається за частотою, напрямком поширення, поляризацією та фазою з випромінюванням, яке його спричинило. Саме ця властивість індукованого випромінювання дозволяє отримати когерентне випромінювання за допомогою лазера. Поглинаючи електромагнітну енергію, частинка (атом або молекула) переходить на енергетичний рівень з великим значенням енергії. Цей стан частинки називається збудженим. Мимовільне випромінювання виникає мимоволі під час переходу частинки з верхнього рівня на нижній. Це не залежить від зовнішніх впливів, а визначається лише властивостями частинок.

Щоб отримати електромагнітне поле, яке взаємодіє з ансамблем частинок однакової структури), необхідно, щоб кількість частинок на верхньому енергетичному рівні була більшою, ніж на нижньому. Цей стан ансамблю частинок називається зворотним або станом з оберненою заселеністю.

"Серце" лазера є його активним елементом. Просочення - це атоми або

молекули, які мають дуже важливу властивість у цьому випадку. Перебуваючи на одному зі своїх верхніх енергетичних рівнів, вони можуть залишатися на ньому відносно довго, не поспішаючи мимоволі (мимовільно) повернутися на нижчі рівні. Тому можна «накопичити» досить багато атомів (молекул) на цьому рівні

- так що їх буде більше, ніж на нижчих рівнях. В результаті буде створено зворотну сукупність рівнів, що необхідно для переваги процесів вимушеного випромінювання світла над процесами поглинання світла. Рівень, на якому може накопичуватися надлишок атомів або молекул, називається довгожителем, а самі атоми і молекули - активними центрами.

Поглинаючи випромінювання спеціальної лампи освітлювача, активні центри збуджуються: вони переміщуються на верхні рівні (рівень 3). Потім вони швидко

«падають» 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 досить "сигналу", роль якого буде грати фотон, з енергією, рівною різниці енергій рівнів 2 і 1 для переходу активних центрів з рівня 2 на рівень 1. В результаті цього переходу виникне лавина фотонів, що і буде являти собою лазерне випромінювання.

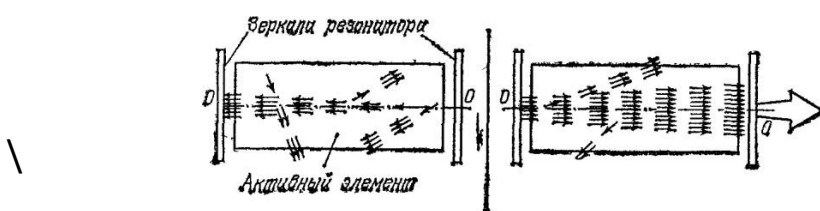
Через те, що спонтанно генеровані фотони випромінюються активними центрами непослідовно в часі та в різних напрямках, для отримання лазерного випромінювання ансамбль частинок повинен знаходитися в резонаторі, який у найпростішому випадку являє собою два дзеркала з коефіцієнтами відбиття r_1 та r_2 .

Схематично це показано на рис. 3.4 Напрямок генерації лазера вказаний на малюнку як 001. Спонтанні фотони, випадково народжені в напрямку 001, пройдуть відносно довгий шлях всередині активного елемента, який, крім того, збільшується в рази внаслідок відбиття випромінювання від дзеркал резонатора . з збудженими активними центрами ці фотони ініціюють, зрештою, потужну лавину примусово

випромінюваних фотонів, яка утворює лазерний промінь. Що стосується тих спонтанних фотонів, які народжуються в інших напрямках, вони (як і відповідні лавини вторинних фотонів) пройдуть всередині активного елемента порівняно коротким шляхом і дуже швидко

"вийдуть з гри".

Таким чином, дзеркала оптичного резонатора випромінюють певний напрямок у просторі, уздовж якого реалізуються найбільш сприятливі умови для розвитку фотонних лавин. Це напрямок лазерного променя, що виходить від резонатора через одне з його дзеркал (так зване вихідне дзеркало; воно частково напівпрозоре для лазерних вимірювань



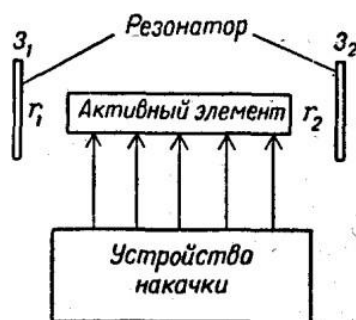
Мал. 3.4. Розвиток фотонної лавини уздовж осі резонатора OO'

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

Отже, для одержання лазерного випромінювання необхідно мати ансамбль часток, у якому може бути створена інверсна населеність, резонатор і пристрій, що забезпечує одержання інверсного стану. Ансамбль часток, у якому може бути створена інверсна населеність, називають активною речовиною або активним

елементом лазера. Сукупність же елементів, що забезпечують одержання інверсної населеності, називають пристроєм або системою накачування.

Структурна схема лазера зображена на мал. 3.5



Мал. 3.5. Структурна схема лазера

3.1.2. Активна речовина лазера

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

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

В активному елементі - гранаті з неодимом гранат являє собою прозорий кристал, активними центрами є іони неодиму, що вводяться в кристал граната в процесі

виготовлення активного елемента. У малому. 3.6, а система енергетичних рівнів іону неодиму в гранаті показана в спрощеному вигляді.

На рис. 3.6, б схематично показано, як збуджувати активні центри в лазері. Активний елемент і лампа-підсвічувач мають циліндричну форму. Вони розміщені всередині відбивача таким чином, що майже вся енергія світла, випромінювана лампою-лампою, концентрується 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 та дірки). Під впливом накачування електрон переходить з валентної зони в зону провідності, і утворюється електрон-діркова пара. Як і будь-яка система, електрон і дірка, як правило, займають положення, що відповідає мінімальній енергії, тому електрон прагне займати допустиме положення біля дна зони провідності, а дірка

- біля стелі валентна смуга.

У рідких лазерах використовують як діючу речовину:

· розчини неорганічних сполук рідкісноземельних елементів (європію, тербію чи неодиму),

барвники - складні органічні сполуки з інтенсивними смугами поглинання в видимі та ультрафіолетові області спектру.

У рідких лазерах з рідкісноземельними елементами лазерне випромінювання виникає при переходах від метастабільних рівнів іонів цих елементів, збудження активного іона в металоорганічній рідині відбувається в результаті внутрішньомолекулярної передачі енергії від органічної частини складний до іона. У лазерах на органічних барвниках активною речовиною в них є барвник, а матриця - розчинником. У рідких лазерних середовищах може бути досягнута висока концентрація активних частинок, що дає можливість, як у твердотільних лазерах, отримувати високі енергії та потужності випромінювання на одиницю об'єму

активної речовини. Рідини не мають постійних напружень, структурних неоднорідностей та включень, внаслідок чого їх оптичні характеристики є ізотропними та постійними за обсягом, що сприяє виробленню випромінювання з високим ступенем просторової когерентності та напрямку. Рідкі лазери не спричиняють незворотного руйнування активної речовини при високій густині енергії.

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

Газові активні середовища лазерів суттєво 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 та безперервному режимах. Газоподібне активне середовище обумовлює низку специфічних особливостей газових лазерів.

Вони характеризуються високою монохроматичністю та спрямованістю випромінювання, оскільки гази мають значно меншу щільність та 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.), Metали (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 активних речовинах на нейтральних та іонізованих атомах переходи між електронними рівнями використовуються для отримання лазерного випромінювання, і в молекулярних лазерах використовуються переходи між електронними, електронно-коливальними, коливальними, коливально-обертковими

та чисто обертовими рівнями.

Типовим представником лазера на нейтральних атомах (атомних) є гелій-неон.. Його перевагами є узгодженість випромінювання, низьке споживання енергії (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 тривалістю в одну мікросекунду.

Основними галузями практичного застосування гелієво-неонових лазерів є дослідження та вимірювальні технології.

3.1.3.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 втрати незначні лише для тих хвиль, перпендикулярний напрям яких перпендикулярний площин дзеркал або відхилених 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.

3.2. Оптичні датчики

Безконтактне вимірювання ряду фізичних величин, таких як переміщення, вібрації, температури тощо, можливе лише за допомогою оптичних датчиків. У цьому випадку інформація передається не за допомогою кабелю, а за допомогою світлових хвиль, які можуть змінюватися за інтенсивністю, фазою або кольоровим геометричним розподілом у просторі і, отже, придатні для прийому та передачі інформації. Надзвичайно простим оптичним датчиком є, наприклад, відомий фотоелемент.

Фотоелемент складається з джерела світла (лампи розжарювання або світлодіода) та приймача (фотодіода або фоторезистора).Порушення пропускання

світла від джерела до приймача служить інформацією про наявність об'єкта у фотоелементі. Якщо кількість імпульсів віднести до одиниці часу, то, наприклад, у конвеєрному виробництві можна отримати інформацію про кількість виготовлених деталей за 1 годину або за день.

ефектів.

3.2.1. Фотодіоди

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

На практиці найчастіше використовують кільцеві діоди. Кремній (и) з високим імпедансом. Коли промені світла з досить високою енергією ($E = h\nu$) падають на p-перехід, створюється фотострум I_{sh} (струм короткого замикання) порядку $0,1 \dots 1 \text{ A / W}$. Чутливість такого фотодіода багато в чому залежить від довжини хвилі (кольору) використовуваного випромінювання. У маленькій. 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 утворюються у вигляді фотоструму I_{sh}

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

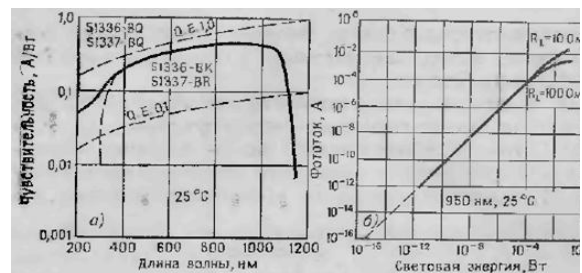
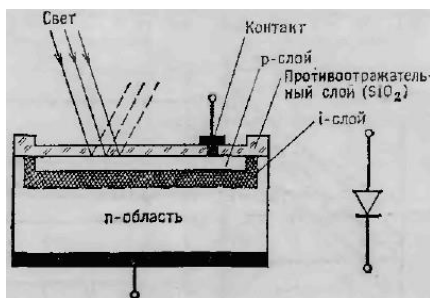


Рис. 3.7. Структура рін-діода.

Рис. 3.8. Характеристики рін-діода.

Нижній діапазон цієї характеристики обмежений шумом (шум Джонсона, темний шум і дробовий шум). Цей параметр визначається як відношення шумового струму (в А / Гц^{1/2}) до чутливості до світлового потоку (в А / Вт) при співвідношенні сигнал / шум 1. Оскільки чутливість до потоку випромінювання залежить від довжина хвилі, те саме стосується і параметра EPS. Виробники детекторів випромінювання часто вказують значення EPS в максимумі кривої чутливості, і майже завжди в звичайних детекторах випромінювання воно становить приблизно 10-15 Вт / Гц^{1/2}.

Перетворення слабких фотострумів порядку 10⁻⁸ .. 10⁻² А вимагає ретельного підбору схем підсилювача. Типові схеми для перетворення струму - напруги показані на рис. 3.9, а та б.

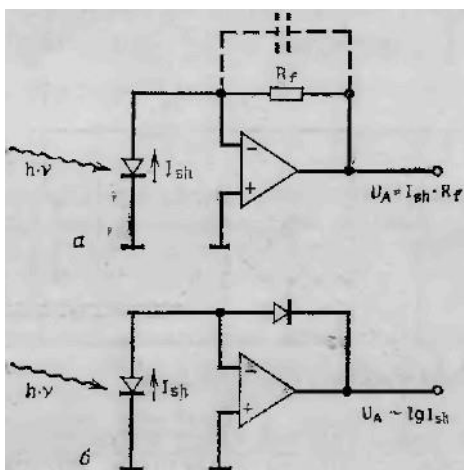


Рис. 3.9. Лінійне (а) і логарифмічне (б) посилення по струму.

Перетворення струм - напруга з забезпеченням лінійності вихідної напруги здійснюється за допомогою резистора R_f у ланцюзі зворотної, зв'язку

операційного підсилювача. Для великих посилень слабких фотострумів застосовують операційні підсилювачі на польових транзисторах з високим вхідним опором (10^{11} Ом) і високоомні резистори R_f .

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

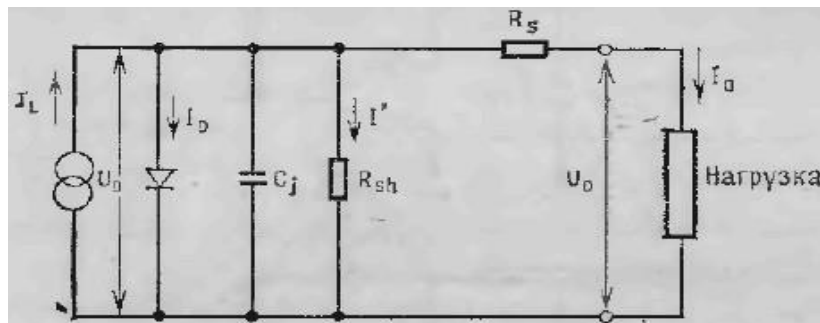


Рис. 3.10. Еквівалентна схема рпн-діода.

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

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

струм виходить рівним

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

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

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

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

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

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

$$I_{sh} \approx I_L$$

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

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

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

3.2.2. Конвертер світло-напруга

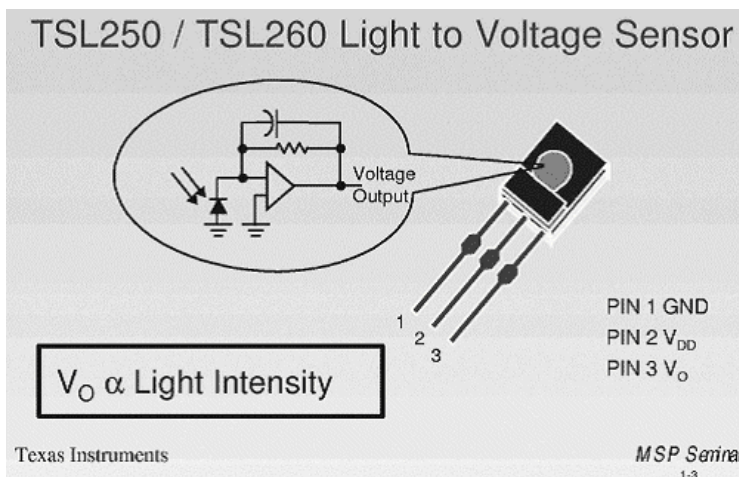
Оскільки перетворення слабких фотострумів вимагає ретельного вибору схем підсилювачів, використовуємо конвертер "світло - напруга" у якого великий фотодіод з великою областю об'єднаний з підсилювачем, так що вихідний струм фотодіода перетворений у напругу. LinCMOS™ процес, використовуваний для низьковольтних операційних підсилювачей адаптований Texas Instruments для датчиків інтенсивності світла, щоб робити інтегровані фотодатчики. Фотодіод у прозорій пластмасі, зроблений із застосуванням цього процесу чуттєвий від 400 nm до 1100 nm (видима

й інфрачервона область). TSL250 і TSL230 інтегровані світлові датчики відповідають цілком цьому спектральному діапазону.

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

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

3.11.

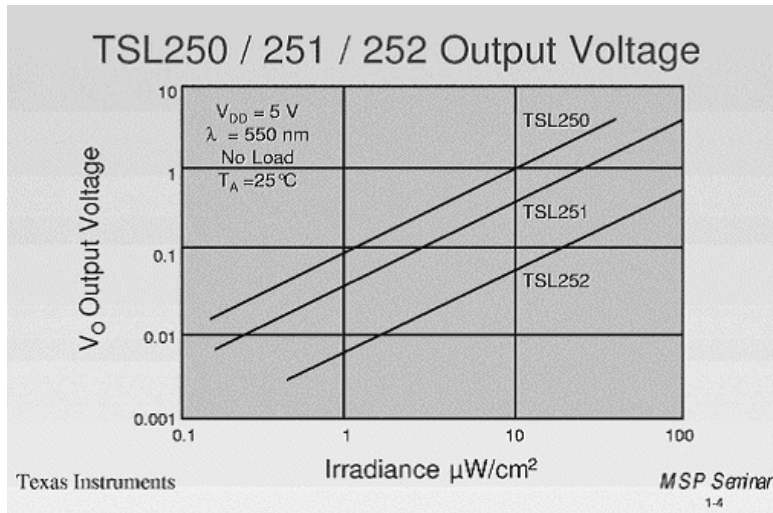


Мал.. 3.11.

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

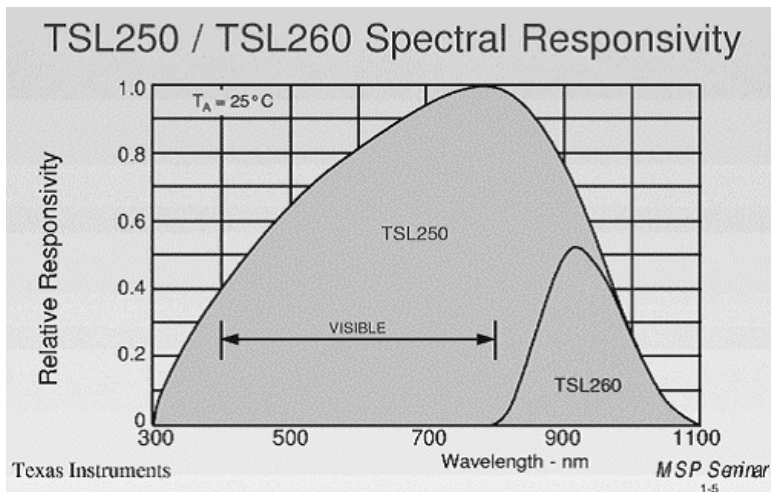
Варіанти Чутливості

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



Мал. 3.12.

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



Мал. 3.13.

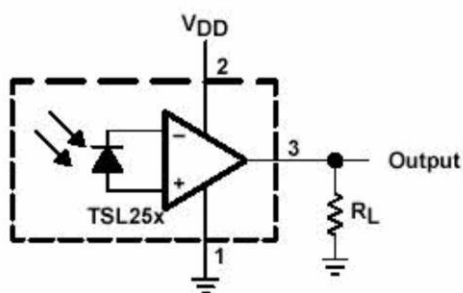
Підсилювач трансимпедансу LinCMOS™ (аналог підсилювача TLC272) забезпечує стабільне перетворення вхідного сигналу. TSL250 пропонує розширений динамічний діапазон з лінійною потужністю до 3 В і випромінює лише 3 мВ у темряві. Це робить

TSL250 менш чутливим до зовнішніх електричних шумів, тому дуже стабільний датчик може бути реалізований без дорогих і громіздких методів екранування.

Сімейство TSL250 має високолінійну, стабільну вихідну напругу з низьким імпедансом. сигнал змінюється на 1 мікр вольт за 1 градус Цельсія. Це пов'язано з тим, що температурний коефіцієнт резистора зворотного зв'язку з полікристалічного кремнію компенсує температурний коефіцієнт фотодіода. струм (800 нА 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, встановлений фільтр, що блокує видиме світло, а датчики виготовлені з пластику, який пропускає інфрачервоний діапазон. Сімейство датчиків, призначених лише для інфрачервоного діапазону - TSL260, TSL261 і TSL262. Чутливість цих пристроїв приблизно вдвічі нижча.

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



Мал. 3.14.

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

Найнижчий

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

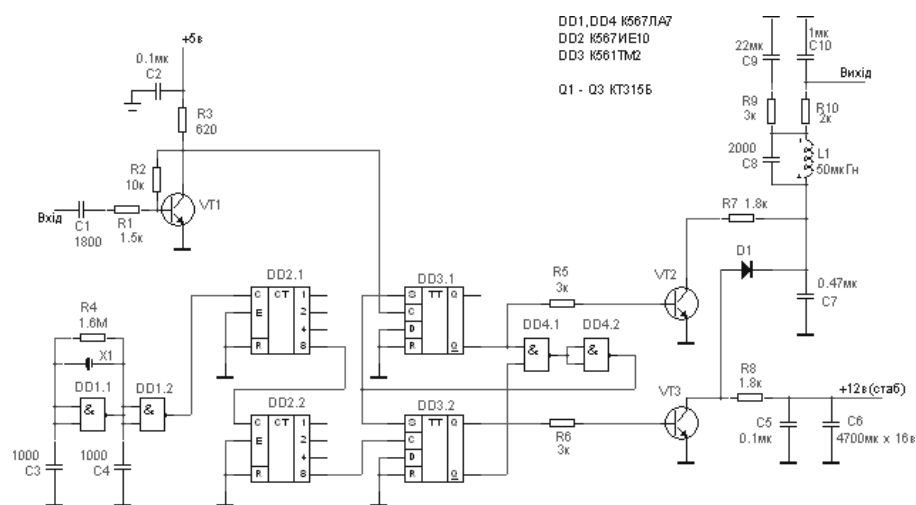
3.3.Частотний детектор

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

Частотний детектор складається з декількох функціональних блоків. Формувач вхідного сигналу складається з транзистора Q1 і додаткових елементів R1,R2,R3, що забезпечують потрібний зсув сигналу. Зсув необхідний для того, щоб

подавати сигнал у наступний каскад (фазовий компаратор) тільки логіки КМОП: рівень логічного нуля нижче 0.3Uд.ж., логічної одиниці вище 0.7Uд.ж..

Конденсатор C1 виділяє перемінну складову вхідного сигналу.



Мал. 3.15.

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

Кварцовий резонатор можна замінити меншим із відповідним зменшенням 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 та збільшення дальності необхідно дати строго симетричний вхідний меандр. Схема така, що без вхідного сигналу (або коли він дорівнює еталонному) на його виході існує потенціал $U_{zh} / 2$. За допомогою цього компаратора смуга спостереження при зміні вхідної частоти залишається в зазначених межах при сильних перешкодах. Такий компаратор краще забезпечує спостереження на частотах, близьких до гармонік опорної частоти. Особливістю використання FC є те, що фазовий кут між сигналом і виходом компаратора варіюється від 0 до 180 °. На центральній частоті цей 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 меандру $U_{j}/ 2$, однак, навіть після хорошого фільтра низьких частот, вихідна напруга має деяку складову другої гармоніки опорної частоти. Цю перешкоду подолати найважче. Діапазон спостереження з використанням FC визначається смугою низьких частот.

Вихідний сигнал видаляється з фільтра низьких частот - фільтра низьких

частот: R9, R10, C9, C10, де згладжується імпульсний сигнал, генерований компаратором фаз.

L1, C8 налаштовується на частоту, на якій зміщується опорне випромінювання лазера -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.

3.4.Інтегратор

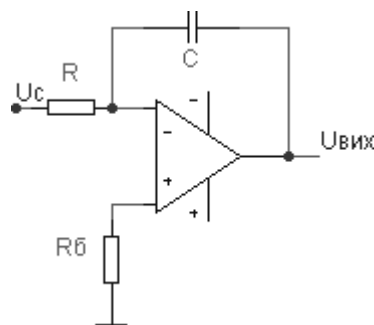
Як відомо, швидкість $V=dS/dt$, де S - переміщення. Якщо ми хочемо одержати вібропереміщення, то потрібно проінтегрувати сигнал віброшвидкості. Для цього ми використовуємо інтегратор.

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

Вихідна напруга підсилювача описується вираженням:

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

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



Мал. 3.16.

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

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

,тобто вихідний сигнал лінійно зростає з часом.

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

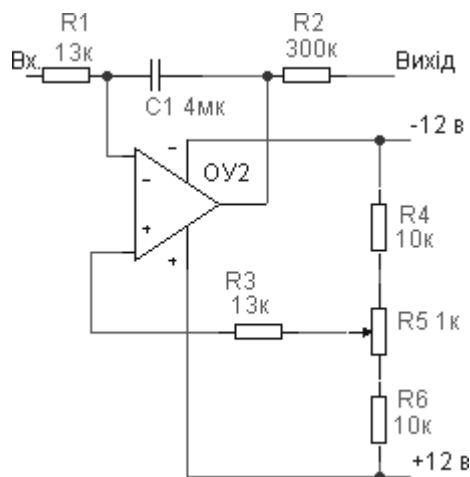
Точність інтегрування багато в чому визначається рівнем електричних втрат у конденсаторі, тому що конденсатор має власну постійну часу $T_0 = R_{i3}$, де R_{i3} - еквівалентний опір ізоляції.

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

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

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

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



Мал. 3.17.

3.5.ЦАП з USB інтерфейсом

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

3.6.Основні положення, що враховуються при конструюванні

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

Аналогові та цифрові блоки повинні бути розміщені на різних платах і встановлені в окремих екранованих відділеннях корпусу. Це кардинально виключає проникнення аналогових компонентів в аналогові пристрої, які виникають під час перехідних процесів у цифрових пристроях.

Імпульсні перешкоди на основі вищих гармонік можуть легко проникати в сусідні вузли через загальні ланцюги живлення. Тому аналогові та цифрові пристрої

переважно живляться від окремих джерел. Якщо використовується загальне джерело, необхідно використовувати широкосмугові схеми 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 та конденсаторів, зазначені на схемах, усереднені. У конкретних випадках потрібно буде виділити деякі елементи. Наприклад, вибір постійної часу ФНЧ залежить від необхідності встановлення двох суперечливих параметрів - швидкості спостереження змін частоти та рівня придушення опорних частотних сигналів (збільшення постійної часу призводить до зменшення швидкості спостереження змін частоти).

струми, що виникають внаслідок витоку статичної електрики з рук монтажника, рекомендується прокладати провідники подалі від країв плати. Слід також зазначити, що всі найсуворіші заходи щодо захисту електростатичних датчиків можуть бути безглуздими, якщо персонал необережно поводить з дошками.

Корисно прокласти захисні провідники поруч із сигналами, щоб забезпечити витік заряду на землю. Рекомендується розміщувати захисні елементи, наприклад, обмежувальні діоди, у вхідних ланцюгах всіх чутливих елементів. Щоб зменшити перешкоди та шум, необхідно забезпечити хороше заземлення з низьким опором.

Як і окремі компоненти, захист системи в цілому може значно зменшити шкідливий вплив зовнішніх електромагнітних перешкод. Принцип роботи екрану полягає в тому, чи відбувається поглинання електромагнітного та

електростатичного полів. На низьких частотах магнітне поле поглинається, на високих - відбивається. Високочастотне відбиття зумовлене невідповідністю між

низьким імпедансом металу та високим імпедансом фронту хвилі.

Для захисту від електричних полів низької частоти рекомендується використовувати екрани з немагнітних матеріалів, таких як алюміній або мідь, оскільки вони краще відображають небажані промені.

Для захисту від низькочастотних магнітних полів використовуються матеріали з високою магнітною проникністю, такі як залізо, феронікелеві сплави, мю-метали та пермаллой. Магнітна проникність цих матеріалів зменшується із збільшенням частоти, тому екрани їх на високих частотах неефективні. Однак у цьому випадку мідні та алюмінієві екрани працюють добре, оскільки вони відображають падаючу хвилю через різницю між імпедансами середовища та екраном. Матеріали з високою провідністю, такі як мідь або алюміній, корисні для захисту від електричних полів, але неефективні для низькочастотних магнітних полів.

Важливо забезпечити безперервний екран навколо системи, що захищається. Для усунення витоку всі отвори на екрані повинні мати діаметр, що не перевищує $l / 20$, де l - мінімальна довжина хвилі сигналів. Іншими словами, не повинно бути отворів, які виконують роль щілинних антен. Невикористані розетки також можуть виконувати роль антен, тому вони повинні бути покриті абсорбуючим матеріалом. Всі ізолюючі елементи повинні мати достатню діелектричну міцність, щоб уникнути пробою під впливом сильного електричного поля. Встановлення роз'ємів всередині поглиблень допомагає уникнути випадкового контакту з предметами, зарядженими статичною електрикою. Всі кабелі, що використовуються для введення сигналів в екранований корпус, повинні бути екранованими, а їх оплетка повинна мати якісний круговий контакт з корпусом, щоб уникнути ефектів антени.

3.7. Програмні аналізатори спектра

Спектральні аналізатори можна розділити на два основні класи - реальний час та так звані нелінійні (офлайн). Перші обробляють звуковий сигнал безпосередньо з

АЦП звукової карти, динамічно відображаючи спектр, другі вимагають попередньої запису оцифрованого сигналу в або пам'яті на диск з подальшою обробкою та відображенням спектра - статичного або динамічного.

аналізатори призначені для «оголеної машини» (DOS) та деяких звукових карт середнього класу (зазвичай Sound Blaster Pro або Gravis Ultrasound), тоді як нові орієнтовані на Microsoft Windows, що дозволяє використовувати будь-яку звукову карту в

Принцип роботи будь-якої програми цього типу полягає у виконанні на фрагменті оцифрованих звукових операцій швидкого перетворення Фур'є (ШПФ, або Швидке перетворення Фур'є - БПФ), в результаті чого послідовність миттєвих значення амплітуди на часовому відрізку перетворюється в набір амплітуд частотних складових на цьому відрізку, який відображається у вигляді спектральної діаграми.

Кількість компонентів, отриманих в результаті ШПФ, завжди дорівнює ступеню двох (2-4-8-16-32 тощо).

ШПФ тісно пов'язаний з концепцією так званої функції згладжування (намотування), яка називається усуненням «розірваного» характеру оброблюваного сигналу, що генерується кінцевою довжиною кожної групи вибірок, обраних для БПФ. Функція згладжування забезпечує мінімальні вимоги до перетворення Фур'є - нульову амплітуду початкової та кінцевої вибірки, а в ідеалі - плавне збільшення амплітуди сигналу на початку серії та плавне її ослаблення в кінці, запобігаючи помилкам перетворення та появі сторонніх частотні складові. Такою функцією можуть бути синус (Хеммінг, Ганнінг), трикутник (Парцен), квадратична функція (Уелч) або просте занулення крайніх показань (Прямокутник). та динамічний - коли фрагменти оцифрованого звуку регулярно вводяться безпосередньо із звуку або карти попередньо підготовленого файлу, а також регулярно відображаються як "жива" графіка. Цей режим також використовує "тривимірне" відображення серії миттєвих графіків на осі часу.

При достатній швидкості роботи комп'ютера робота в режимі реального часу можлива, коли відображення спектра синхронізується із вхідним сигналом. Однак, незважаючи на порівняно швидкий алгоритм ШПФ, обробка за допомогою нього вимагає значних обчислювальних ресурсів, тому за відсутності швидкості доводиться вдаватися або до попередньої запису з подальшим повільним прокручуванням, або до «стоншення» зразків, зберігаючи режим реального часу.

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

Кожна програма виконана у двох версіях - для звичайного Sound Blaster та сумісних карток (sbfreq, sbspec) та для Media Vision Pro Audio Spectrum 16 (PAS 16) - частота, спектрограма. Універсальна версія працює з 8-бітовою оцифровкою (відношення сигнал / шум близько 50 дБ), версія для PAS16 - з 16-бітною (близько 98 дБ). Однак слід мати на увазі, що оцифрування сигналів із рівнем шуму 96-98 дБ реалізується лише деякими професійними картами, такими як Дарла чи Фіджі, та навіть тоді лише з хорошим джерелом живлення, материнською платою та периферією, більшість сучасних карток мають рівень шуму в межах 75-90 дБ

Обидві програми отримують параметри з INi-файлів, і ряд параметрів можна замінити параметрами командного рядка. Крім того, деякі режими можна змінювати 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 спектра, рівну половині частоти дискретизації. Для Sound Blaster та сумісних карт частота дискретизації може бути в діапазоні 5000..44100 Гц, для PAS16 вона може досягати 88200 Гц.

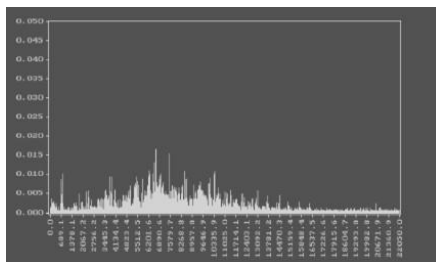
- Кількість точок Фур'є - визначає точність спектрального графіка, що складається з заданої кількості частотних складових. Число має бути в два рази і може коливатися від 8 до 2048. Збільшення кількості точок уповільнює програми.

- Тип функції згладжування.

- Тип осей графіка - логарифмічна або лінійна.

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

- Тип корекції АЧХ - лінійна або зростаюча (PRO, 3, 6, 9, 12 дБ / жовтня). Використовується для компенсації спаду амплітуд вищих гармонік, дозволяючи чіткіше їх бачити на графіку. Одночасно визначається частота, з якою АЧХ починає зростати. Freq також можна встановити для відображення миттєвих значень, коли кожне послідовне відображення діаграми стирає попереднє зображення або режим утримання максимальних значень при їх повільному спаді (занепаді). Візуально це виглядає як "метання" стовпців їх пікових значень, які потім повільно ковзають вниз.



Мал. 3.21.

- Окрім статичних параметрів, в активному режимі доступна низка команд оперативного управління - зміни частоти дискретизації, гучності БПФ, логарифмічної / лінійної шкали осей, підвищення частотної характеристики,

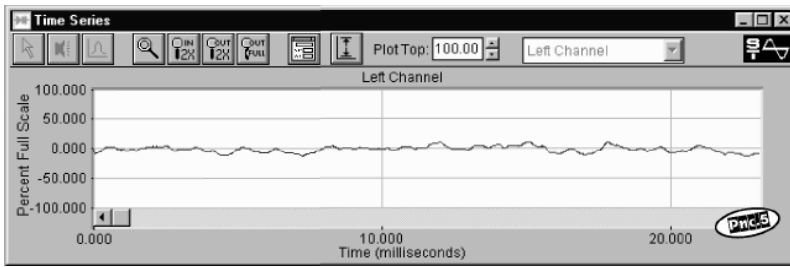
типу віконної функції, відображення компонента з максимальною амплітудою та інші .

- робоча частота показана на рис. 3.21.

• На основі пакету ШПФ, зробленого Філіпом Ван Бареном, Р.С. Хоум розробив просту програму для Windows 3.1 під назвою спектрограма (<http://src.doc.ic.ac.uk/Packages/Windows3/звуки/gram23.zip>). Він не підтримує режим реального часу - натомість вихідний сигнал спочатку записується або береться у готовій формі з файлу, а потім обчислюється спектрограма, яка відображається у вікні прокрутки у "тривимірній" формі, аналогічно вихідній спектрограмі; звичайна форма сигналу відображається у верхній частині вікна. Програма відстежує положення курсору миші у вікні спектрограми і дає точні координати (час / частота); на жаль, не отримано точного значення амплітуди цього компонента. Однак, як уже згадувалося, програма використовує стандартний інтерфейс зі звуковими пристроями Windows, тому може працювати "в повну силу" з будь-якою звуковою картою, що має драйвери для Windows.

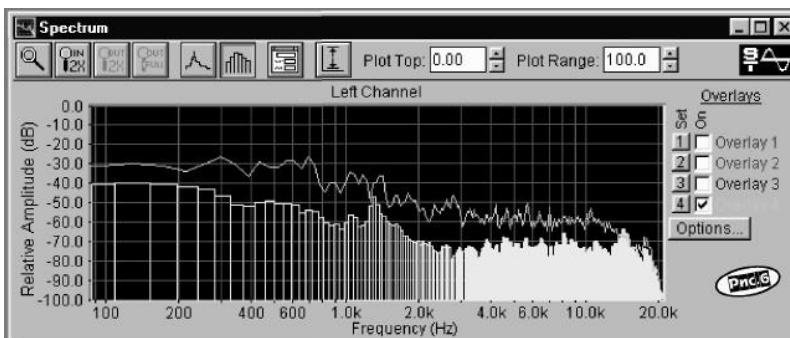
• Дуже функціональна програма для платформ Win32 (Windows 95 / Windows NT, Windows 3.1 + Win32s) під назвою SpectraLAB, розроблена компанією Sound Technology Inc. Пакет SpectraLAB та великий (близько 90 МБ) набір різноманітного звуку приклади доступні під назвою Spectra PLUS.

• SpectraLAB - надзвичайно потужний інструмент для аналізу звуку. Результати обробки сигналів можуть відображатися у п'яти форматах (Перегляд): Time Series - звичайна осциллограма (мал. 3.25), Spectrum - "миттєва" спектрограма (мал. 3.26.) на зразок виведеної freq.



Мал. 3.22.

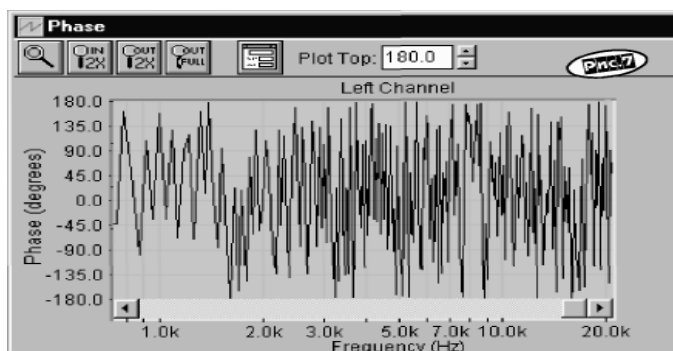
- Спектр може відображатися у виді лінійного графіка чи стовпчикової діаграми. Punkti Overlay служать для рівнобіжного відображення у вікні до чотирьох допоміжних спектральних графіків різних колборів, з якими можна візуально порівнювати динамічний спектр. Кнопки Set роблять "миттєвий знімок" поточного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



Мал. 3.23.

- Phase - графік зміни фаз частотних складових (мал.3.24)
- Spectrogram - "тривимірна" динамічна спектрограма на зразок виведеної Spectrogram

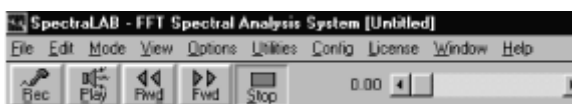
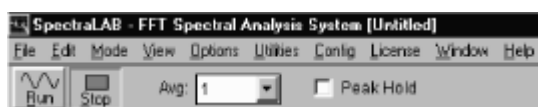
- 3D Surface - вид "функціональної поверхні", на якій серія спектральних графіків зображується в перспективі.



Мал. 3.24.

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

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





Мал. 3.25.

Параметр Середнє (усереднення) визначає кількість проходів ШПФ перед кожним вихідним зображенням; результати кількох проходів усереднюються перед висновком. Менші значення параметрів рекомендуються для швидкозмінних сигналів і великі параметри для шумних сигналів.

Пікове утримання включає пікові значення, коли висота кожної спектральної смуги може зростати лише тоді, коли перевищено раніше досягнуте пікове значення. Вікна, що мають часову координату, доступні в режимах запису та подальшої обробки і дозволяють миші вибрати ділянку сигналу для подальших операцій копіювання, вирізання, вставки, фільтрації, відтворення тощо. Для вікон, які не мають цієї координати, доступні лише кнопки масштабування лупи. сітки, смуги частот для спектральних графіків, частота оновлення зображення, напрямок виведення спектрограми тощо. Крім того, у кожному вікні є контекстне меню, яке активується натисканням правої кнопки миші всередині області графіку та утриманням команд для копіювання вмісту вікна в буфер обміну (у формі оцифровки або серії числових значень у вигляді рядків ASCII), відфільтруйте вибраний фрагмент і обчисліть різні значення - потужність сигналу, усереднений спектр, інтеграл тощо. Меню Налаштування встановлює різні загальні налаштування програми.

Параметри - бітрейт, частота оцифрування, коефіцієнт децимації (децимація), обсяг БПФ, тип функції згладжування, кількість каналів і різниця фаз між ними, контроль над перевантаженням і ступінь взаємного перекриття блоків ШПФ для повідомлення -режим обробки:

Двоканальна обробка пропонує ряд потужних двоканальних можливостей обробки - обчислення перехресного спектру, функції передачі та ступінь когерентності (аналог статистичного коефіцієнта кореляції).

Масштабування - тип амплітудної (лінійної / логарифмічної) та частотної осей (лінійна, логарифмічна, октавна або 1/3, 1/6, 1/9, 1/12 або 1/24 октави), а також як крива АЧХ мікрофона, завантаженого з файлу, чи вказана серія пар "частота - рівень", уздовж якої повна крива інтерполюється за допомогою кубічного сплайну.

Тригер - це умова запуску програмного процесора. Містить порогове значення (пори́г), його тип (рівень - абсолютний надлишковий рівень, фронт - стрибок із заданою амплітудою), полярність, зсув часу запуску процесора з моменту роботи (вперед або назад), канал в які аналізуються умови запуску, а також режим циклічного перезапуску (Re-Arm). Коли досягається умова запуску, процесор обробляє певний обсяг даних (у реальному часі та після обробки - кожен блок ШПФ, в режимі запису - одна секунда):

Калібрування (калібрування) - увімкнення програми опорний сигнал з його параметрами.

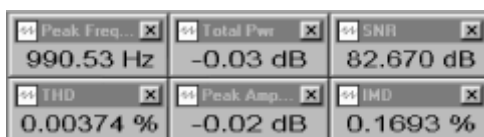
Маркери - завдання до шести вибраних частот та / або амплітуд, які будуть окремо вказані на графіках - колір, оцінки по осях або координати стрілками замість стовпців на спектрограмі. Вони можуть використовуватися, наприклад, для виділення значень, що мають особливе значення.

Меню Службові програми дозволяє виконати ряд додаткових корисних операцій. рожевий шум, синусоїдальні сигнали (1 кГц або набір з десяти сигналів заданих частот і рівнів), переривчасті (серійні) сигнали, пилкоподібний, трикутний та прямокутний сигнал, одиничні імпульси, тестові сигнали для обчислення коефіцієнта інтермодуляції спотворення та довільні форми сигналів із файлів WAV. Результат генератора також можна зберегти у WAV-файлі.

Крім того, за допомогою службових програм ви можете відкрити ряд

додаткових маленьких вікон (рис. 3.26), відображаючи корисні значення, розраховані за результатами обробки: Пікова частота - частота пікової складової, Загальна потужність - загальний сигнал потужність, загальне гармонійне спотворення - відсоток гармонічних спотворень (+ шум - разом із шумом), інтермодуляційні спотворення - відсоток інтермодуляційних спотворень, сигнал - коефіцієнт шуму / відношення сигналу.

Останні чотири режими вимагають подачі синусоїдального сигналу на вхід карти; для THD рекомендується частота 1 кГц, для IMD - два тони різної частоти, для SNR частота тону може бути кожний. SNR обчислюється як відношення потужності пікової спектральної складової до потужності всіх інших складових сигналу.



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

Мал. 3.26.

при роботі в двоканальному режимі стає доступною функція Delay Find, за допомогою якої можна визначити відносну затримку звуку між каналами. Наприклад, підключивши динамік до виходу та мікрофон до входу

, ви можете визначити час проходження звуку від динаміка до мікрофона, безпосередньо або після того, як він відбивається від стін кімнати стеля. Потім розрахована затримка може бути компенсована шляхом автоматичного введення її в параметри процесора за допомогою кнопки Застосувати до затримки обробки.

Нарешті, реєстрація даних дозволяє записувати результати, що відображаються в одному з вікон у текстовому файлі, у вигляді рядків, що містять мітки часу

та фактичні числові значення. Як і вихід у вікна, реєстрація у файлі може виконуватися з максимально можливою швидкістю або з заданим інтервалом, а діапазон частот може бути обмежений.

Безперечно, SpectraLAB є найпотужнішою та універсальною з відомих програм спектрального аналізу.

Під час запису та вивчення сигналу з входу звукової карти не забувайте, що АЦП передає лише частоти менше половини частоти дискретизації (межа для більшості простих карт становить 44,1 або 48 кГц), а в деяких картах частотна характеристика помітно зіпсована у верхній частині, тому реальну межу частотного діапазону конкретної карти можна визначити лише експериментально.

ВИСНОВОК

Лазерні доплерівські датчики вібрації 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 джерел лазерного випромінювання через спектрометричні труднощі можна було виміряти лише відносно високі швидкості. Все це дає можливість вимірювати менші перерізи розсіювання з великим кутовим дозволом. Крім того, висока монохроматичність лазерного випромінювання дозволяє використовувати такі методи обробки світлових сигналів, як детектування гетеродину та 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 фотодетектора в діапазоні частот, що перевищує область низькочастотних шумів фотодетектора та 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 - це досить глибокі фізичні та математичні основи методу, а також складність та висока вартість інструментарію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

бинных 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.

— 176 с.

