

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

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ Ю.В. Грищенко
«___» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Ультразвукова система вібродіагностики авіаційної техніки»

Виконавець: _____ Монастирна Наталія Миколаївна _____
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: _____ Лужбін Віктор Михайлович _____
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: _____ (підпис) _____ (прізвище, ім'я, по-батькові)

Консультант розділу «Охорона
навколишнього середовища»: _____ (підпис) _____ (прізвище, ім'я, по-батькові)

Нормоконтролер: _____ (підпис) В.В. Левківський (П.І.Б.)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Ю.В.Грищенко

« ___ » _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Монастирна Наталія Миколаївна

1. Тема роботи: «Ультразвукова система вібродіагностики авіаційної техніки» затверджена наказом ректора від « 05 » 10 2023 р. № 2040/ст.
2. Термін виконання роботи: з 02 жовтня 2023 по 31 грудня 2023.
3. Вихідні дані роботи: Безконтактний принцип вимірювання вібрації. Пристрій обробки сигналу на базі 8-бітного мікроконтролера типу PIC. Інтерфейс зв'язку RS-485. Мінімальна потужність споживання 1-2 Вт.
4. Зміст пояснювальної записки: 1. Аналіз основних характеристик контролю параметрів вібрації авіаційних двигунів. 2. Обґрунтування безконтактного методу вимірювання параметрів вібрації. 3. Структурна організація та принцип побудови інформаційно-вимірювальної системи вібродіагностики. 4. Розробка пристрою вібродіагностики авіаційних двигунів. 5. Охорона праці. 6. Охорона навколишнього середовища
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: 1. Структура стаціонарної системи моніторингу і діагностики. 2. Структурна схема системи дистанційного контролю параметрів вібрації. 3. Принципова електрична схема головного модуля. 4. Блок-схема

роботи головного модуля. 5. Схема електрична принципова модуля індикації. 6. Блок-схема роботи модуля індикації. 7. Компоновка елементів модуля індикації

6. Календарний план-графік

| № пор. | Завдання | Термін виконання | Відмітка про виконання |
|--------|--|------------------|------------------------|
| 1. | Підбір літератури | 02-16.10.2023 | |
| 2. | Підготовка та написання 1 розділу | 17-31.10.2023 | |
| 3. | Підготовка та написання 2 розділу | 01-15.11.2023 | |
| 4. | Підготовка та написання 3 розділу | 16-30.11.2023 | |
| 5. | Підготовка та написання 4 розділу «Охорона навколишнього середовища» | 01-07.12.2023 | |
| 6. | Підготовка та написання 5 розділу «Охорона праці» | 07-14.12.2023 | |
| 7. | Перевірка на антиплагіат та отримання рецензії на роботу | 15-16.12.2023 | |
| 8. | Підготовка презентації та доповіді | 17-20.12.2023 | |

7. Консультанти з окремих розділів

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

8. Дата видачі завдання: «02» жовтня 2023 р.

Керівник дипломної роботи _____ Лужбін В.М.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Монастирна Н.М.
(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Ультразвуковасистема вібродіагностики авіаційної техніки»: 121 сторінок, 34 рис., 6 табл., 10 літературних джерела.

Об'єкт дослідження:система вібродіагностики авіаційних двигунів.

Предмет дослідження:безконтактне вимірювання параметрів вібрації двигуна з датчика.

Мета роботи:розробка електронного пристрою контролю параметрів вібрації авіаційних двигунів.

Методи дослідження:теорія обробки інформації, цифровий синтез електричних схем, математичне моделювання.

Ключові слова: ДВИГУН, ДАТЧИК ВІБРАЦІЇ, ДІАГНОСТИКА, АЛГОРИТМ,
ОБРОБКА СИГНАЛІВ, БЕЗКОНТАКТНИЙ МЕТОД.

ЗМІСТ

| | |
|--|-----------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 7 |
| ВСТУП..... | 8 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ..... | 13 |
| 1.1. Джерела вібрації та їх вплив на роботу обладнання літака..... | 13 |
| 1.2. Системи контролю параметрів вібрації..... | 23 |
| РОЗДІЛ 2. ОБГРУТУВАННЯ ТА ОЦІНКА МЕТОДІВ ВІБРОДІАГНОСТИКИ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ..... | 35 |
| 2.1. Класифікація віброперетворювачів..... | 35 |
| 2.2. Аналіз методів вібродіагностики..... | 40 |
| 2.3. Стаціонарні системи вібродіагностики..... | 48 |
| 2.4. Математична модель вібросигналів..... | 51 |
| РОЗДІЛ 3. СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПРИНЦИП ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ДВИГУНІВ..... | 62 |
| 3.1. Контрольно-вимірювальні системи технічної діагностики..... | 62 |
| 3.2. Вимірювальна і аналізуюча апаратура вібродіагностики авіадвигунів..... | 66 |
| 3.3. Структура апаратних засобів ультразвукової системи вібродіагностики..... | 75 |
| РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ВІБРОДІАГНОСТИКИ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ..... | 82 |
| 4.1. Вибір послідовного інтерфейсу з'єднання..... | 82 |
| 4.2. Розробка головного модуля і модуля індикації..... | 86 |

| | |
|--|------------|
| 4.3. Розрахунок потужності схеми..... | 93 |
| 4.4. Розрахунок джерела напруги..... | 94 |
| 4.5. Розрахунок надійності схеми..... | 96 |
| 4.6. Розрахунок часу автономної роботи виробу | 98 |
| 4.7. Розрахунок елементів кварцового генератора | 98 |
| РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ..... | 103 |
| 5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторівна робочому місці..... | 103 |
| 5.2. Заходи захисту від небезпечних і шкідливих виробничих факторів..... | 106 |
| 5.3. Розрахунок виробничого освітлення..... | 107 |
| 5.4. Заходи щодо пожежної і вибухової безпеки..... | 109 |
| 5.5. Інструкція з техніки безпеки, пожежної і вибухової безпеки..... | 111 |
| РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА..... | 113 |
| 6.1. Визначення факторів екологічної безпеки, що можуть вплинути на стан навколишнього середовища..... | 113 |
| 6.2. Відповідність проекту вимогам природоохоронного законодавства..... | 114 |
| 6.3. Оцінка економічного ефекту від витрати енергії, матеріалів, напівфабрикатів, виробів..... | 115 |
| 6.4. Заходи щодо утилізації відходів..... | 118 |
| ВИСНОВКИ..... | 120 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 121 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

| | |
|--------------|--|
| БПК | – біполярний код; |
| БПП | – багатошарова печатна плата; |
| БСКО | – бортова система контролю і обслуговування; |
| ДПП | – двостороння печатна плата; |
| ЕСІ | – електронна система індикації; |
| ЗП | – запам'ятовуючий пристрій; |
| ІС | – інтегральна схема; |
| КД | – кроковий двигун; |
| ККД | – коефіцієнт корисної дії; |
| КП | – контролер переривань; |
| КПДП | – контролер прямого доступу до пам'яті; |
| ГП | – привід-генератора; |
| МПВ | – модуль приймання-видачі; |
| ОЗП | – оперативний запам'ятовуючий пристрій; |
| ОП | – обчислювальний пристрій; |
| ОПП | – одностороння печатна плата; |
| ОППЗП | – однократно програмований постійний запам'ятовуючий пристрій; |
| ПВРС | – плата видачі разових сигналів; |
| ПЗ | – програмне забезпечення; |
| ПРК | – передавач разових команд; |
| ПРС | – приймач разових сигналів; |
| ПСО | – пристрій сполучення з об'єктом; |
| СПС | – система повітряних сигналів; |
| ЦАП | – цифро-аналоговий перетворювач; |

ВСТУП

Актуальність теми. За останні кілька десятиліть вібродіагностика стала основою контролю і прогнозування стану обертового обладнання. Фізичною причиною бурхливого розвитку вібродіагностики є величезний обсяг діагностичної інформації, що міститься у вібросилах і вібраціях машин, які працюють як у номінальних, так і в особливих режимах. Технічне забезпечення вібродіагностики здійснюється високоточними вібровимірювальними приладами та апаратурою цифрового оброблення сигналів, можливості яких постійно вдосконалюються, а вартість знижується.

Сьогодні діагностична інформація про стан обладнання, що обертається, витягується не тільки з вібрації, а й з інших технологічних параметрів, включно з оперативними і вторинними процесами, що відбуваються в машині. Природно, що розвиток систем діагностики спрямований на розширення одержуваної інформації, причому не тільки завдяки ускладненню методів аналізу сигналів, а й завдяки розширенню спектра контрольованих процесів.

Сучасна діагностика обладнання, зокрема й вібродіагностика, охоплює три основні напрямки:

- параметрична діагностика;
- діагностика несправностей;
- профілактична діагностика.

Параметрична діагностика - це контроль нормованих параметрів обладнання з метою виявлення та ідентифікації небезпечних змін. Вона використовується для аварійного захисту і контролю обладнання, а діагностична інформація включається в таблицю відхилень цих параметрів від номінальних значень. Системи параметричної діагностики зазвичай містять кілька каналів для контролю різних процесів, наприклад вібрації і температури окремих компонентів обладнання.

Обсяг вібраційної інформації, використовуваної в таких системах, обмежений, і кожен канал вібрації контролює два параметри: величину нормованої низькочастотної вібрації та швидкість її наростання. Як правило, вібрація нормується в стандартному діапазоні частот від 2 (10) Гц до 1000 (2000) Гц. Величина контрольованої низькочастотної вібрації не завжди визначає реальний стан обладнання, але її значущість істотно зростає в ситуаціях, що передують виникненню аварійної ситуації, коли з'являється ланцюжок несправностей, що швидко розвивається. Це дає змогу ефективно використовувати засоби протиаварійного захисту на основі величини низькочастотної вібрації. Найпоширенішим типом систем є проста вібросигналізація. Такі системи найчастіше використовують для своєчасного виявлення помилок персоналом, який обслуговує обладнання.

Діагностика несправностей - це визначення типу і величини несправності після того, як факт несправності було зафіксовано. Така діагностика є частиною технічного обслуговування або ремонту обладнання і виконується за результатами контролю параметрів обладнання. Віброобслуговування обертового обладнання, зване віброналагоджуванням, здійснюється переважно за результатами віброконтролю для забезпечення безпечного рівня вібрації у високошвидкісних відповідальних механізмах за частоти обертання ~ 3000 об/хв і вище. Підвищена вібрація на швидкостях обертання і декількох частотах, з одного боку, може істотно скоротити термін служби машини, а з іншого - найчастіше є наслідком окремих дефектів машини або фундаменту. Основним завданням вібровипробувань є виявлення небезпечного підвищення вібрації машини в усталеному і перехідному (пусковому) режимах роботи, виявлення та усунення причин.

У рамках вібродіагностики після виявлення причин підвищеної вібрації проводять низку сервісних заходів, як-от центрування, балансування, зміна вібраційних характеристик машини (відбудова від резонансу), заміна мастильних

матеріалів та усунення дефектів деталей машини й базової конструкції, що спричинили небезпечне підвищення вібрації.

Профілактична діагностика машин і устаткування - це виявлення потенційно небезпечних дефектів на ранній стадії, відстеження їхньої появи і на основі цього прогнозування довготривалого стану обладнання. Вібропереджувальна діагностика машин як самостійний напрям діагностики почала реалізовуватися тільки наприкінці 80-х років минулого століття. Основним завданням діагностики є не тільки виявлення дефектів, а й виявлення вихідних дефектів. Знання типу виявленого дефекту різко підвищує достовірність прогнозу.

Система діагностики складається з вимірювальних приладів для найбільш інформаційно ємних процесів у машині, засобів і програмного забезпечення для аналізу вимірних сигналів, а також програмного забезпечення для розпізнавання стану машини і довгострокового прогнозування. До найбільш інформативних процесів зазвичай відносять вібрації і теплове випромінювання машини, а також струм, який споживають електродвигуни, що використовуються як електроприводи, і компоненти мастила. На сьогодні виявлено лише найінформативніші процеси, що дають змогу з високим ступенем достовірності визначати і прогнозувати стан ізоляції електричних машин.

Превентивна діагностика на основі аналізу одного із сигналів, наприклад вібрації, має право на існування тільки в тому разі, якщо абсолютне число потенційно небезпечних видів несправностей (>90%) може бути виявлено на ранній стадії розвитку і якщо можна прогнозувати безвідмовну роботу машини на період, достатній для підготовки до поточного ремонту. Нині така можливість існує не для всіх типів машин і не у всіх галузях промисловості.

Найбільший успіх вібродіагностики пов'язаний із прогнозуванням стану низькошвидкісного навантажувального устаткування, використовуваного, наприклад, у металургійній, паперовій і поліграфічній промисловості. У такому обладнанні вібрація не має вирішального впливу на надійність. У таких ситуаціях

параметри вібрації максимально відображають стан компонентів обладнання, а превентивна діагностика може принести максимальну користь при мінімальних витратах, якщо компоненти можуть регулярно піддаватися вібровимірюванням.

Вібродіагностика є найбільш складною проблемою для поршневих двигунів і високооборотних газотурбінних двигунів. Корисні вібраційні сигнали багаторазово блокуються в першому випадку вібраціями, зумовленими ударними імпульсами, що виникають під час зміни напрямку руху інерційних елементів, а в другому - шумом потоку, який створює сильні вібраційні перешкоди в контрольних точках, де можливі регулярні вимірювання вібрації.

Успішна вібродіагностика середньошвидкісних машин з частотою обертання від ~ 300 до ~ 3000 об/хв також залежить від типу діагностованої машини та особливостей експлуатації в різних галузях промисловості. Найпростішим рішенням є моніторинг і прогнозування стану широко поширених насосів і вентиляційного обладнання, особливо тих, що використовують підшипники кочення та асинхронні електроприводи. Таке обладнання використовується практично у всіх галузях промисловості та комунального господарства і може бути переведене на технічне обслуговування і ремонт за фактичним станом без істотних фінансових і часових витрат.

Профілактична діагностика транспортного обладнання має свої особливості, оскільки проводиться не в русі, а на спеціальних стендах. По-перше, інтервали діагностичних вимірювань у цьому випадку не визначаються фактичним станом техніки, а плануються на основі даних про пробіг. По-друге, на цьому інтервалі неможливо контролювати режим роботи обладнання, тому будь-яке порушення умов експлуатації може різко прискорити прояв несправностей. По-третє, діагностика проводиться за допомогою спеціальних стендових випробувань, а не в номінальних умовах роботи обладнання, за яких виникає несправність. Під час таких стендових випробувань несправність може не змінювати контрольовані параметри вібрації або змінювати їх не так, як у номінальних умовах експлуатації. У

таких випадках традиційні діагностичні системи необхідно спеціально допрацьовувати для різних видів транспорту, вводити в експлуатацію та узагальнювати отримані результати.

Економічний ефект від впровадження діагностичних технологій безпосередньо залежить від основних показників використовуваної системи діагностики.

Область застосування обладнання, що діагностується.

- імовірність прийняття неправильних діагностичних рішень (імовірність пропуску небезпечних несправностей або помилкових спрацьовувань);

- тривалість і надійність довгострокового прогнозування стану обладнання;

- час, витрачений на моніторинг і прогнозування стану обладнання, що діагностується, протягом одного року;

- обсяг попередніх досліджень (вимірювань), необхідних для досягнення заданої надійності діагностики та прогнозування.

Термін окупності найкращих систем вібродіагностики обертового устаткування зазвичай не перевищує 3-6 місяців після навчання фахівців-діагностів і підготовки контрольно-вимірювальної апаратури до діагностичних вимірювань.

Перспективи діагностики обладнання з погляду зниження обсягу ремонтних робіт можуть бути нівельовані використанням неефективних діагностичних систем.

Найчастіше такі системи випускаються компаніями, що виробляють якісне обладнання для вібромоніторингу, у спробі створити власне діагностичне програмне забезпечення.

Об'єкт дослідження: система вібродіагностики авіаційних двигунів.

Предмет дослідження: безконтактне вимірювання параметрів вібрації двигуна з датчика.

Мета роботи: розробка електронного пристрою контролю параметрів вібрації авіаційних двигунів.

Методи дослідження: теорія обробки інформації, цифровий синтез електричних схем, математичне моделювання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

1.1. Джерела вібрації та їх вплив на роботу обладнання літака

Коливання тіла завжди викликане певними силами руху. Ці сили можуть діяти на об'єкт або надходити ззовні об'єкта чи всередині об'єкта. Отже, вібрація конкретного об'єкта повністю визначається його силою зміщення, напрямком і частотою. Саме з цієї причини аналіз вібрації допомагає виявити руйнівні сили під час роботи машини. Ці сили залежать від стану машини, а знання їх характеристик і правил взаємодії дає змогу згодом діагностувати несправності.

Величини переміщення, швидкості та прискорення в стандартних міжнародних одиницях пов'язані між собою такими рівняннями:

$$\begin{aligned} V[\text{мм/с, пік}] &= 0,159 * A/f [\text{мм/с}^2, \text{пік}] & V &= 1/(2\pi F)*A \\ D[\text{мм/с, розмах}] &= 318,4 * V/f [\text{мм/с, пік}] & D &= 1/(2\pi F)^2 * A \\ D[\text{мм/с, розмах}] &= 50,7 * A/f^2 [\text{мм/с}^2, \text{пік}] & D &= 1/(2\pi F) * V \end{aligned}$$

На рис. 1.1 відображений один і той самий вібраційний сигнал, який представлений у виді вібропереміщення, віброшвидкості і віброприскорення.

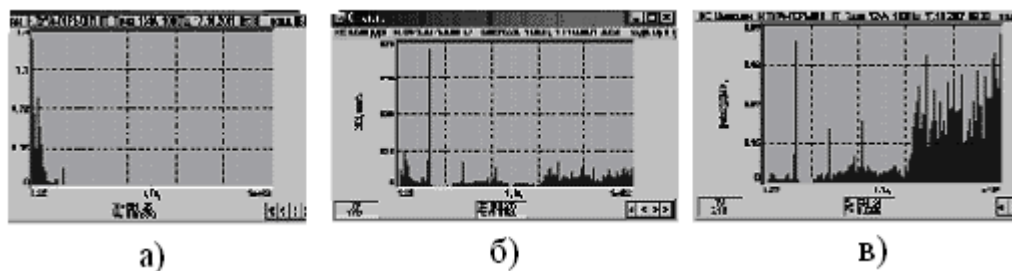


Рис. 1.1. Вібраційний сигнал: а) вібропереміщення; б) віброшвидкість; в) віброприскорення

Крива швидкості має найбільш рівномірну частоту з трьох. Це характерно для більшості відеокамер, але в деяких випадках крива прискорення або відхилення є найбільш послідовною. Найкраще вибрати одиницю вимірювання, для якої частотна крива виглядає найбільш плоскою: таким чином надаючи спостерігачеві максимальну візуальну інформацію.

Швидкість вібрації часто використовується для діагностики машини.

Основними частинами літака, які зазнають вібрації, є крила, хвостове оперення, двигуни та турбіни.

Крутильні коливання представлені періодичним обертанням секцій лопаті навколо осі (жорстка вісь). Часто зустрічаються крила з великими концентрованими масами. Наприклад, двигун встановлений на пілонах крил, паливні баки розташовані в крилах і т. д. Це ускладнює форму коливання крила.

Крім крутильних коливань, крила літака також піддаються горизонтальним (гнучким) коливанням.

Зазвичай все крило піддається згинальним коливанням. При будівництві літального апарату важливо створити умови, що виключають виникнення вібрації в польоті (поєднання згину і скручування). Резонансні вібрації від хвостової частини (контролера) літака становлять значну небезпеку. Причиною їх появи є збіг власної частоти коливань частини хутра з частотою удару двигуна.

Тяги, опори, до яких вони кріпляться, тощо особливо чутливі до резонансних коливань. Ми часто спостерігаємо коливання «полірованого» типу, породжені збіжними вихорами від передніх частин літака: від крил, у точці з'єднання з фюзеляжем, від двигунів у русі їх невелика кількість тощо.

На додаток до вібрацій, які враховуються в різних частинах літака, необхідно враховувати можливість вібрацій компонентів двигуна. Вібрація двигуна літака - ознака біди.

Розвиток розлому, поява нових розломів призводить до збільшення коливань.

Підвищення значення вібрації свідчить про несправність двигуна, що робить його небезпечним, а додаткова вібрація може спричинити пошкодження двигуна. Існує кілька причин вібрації двигуна літака. ГОСТ 26382-84 окремо регламентує вібрацію двигуна з частотою першої гармоніки ротора до частоти обертання ротора двигуна і вібрацію з частотою першої гармоніки ротора.

Причинами виникнення коливань з частотою першої гармоніки обертання можуть бути:

- дисбаланс роторів двигунів, зумовлений технологічними особливостями виготовлення та складання двигунів, пошкодження деталей двигуна в процесі експлуатації (злам і вигин лопаток компресорів і турбін, тріщини дисків, пошкодження підшипників тощо);
- неспіввісність роторів, з'єднаних послідовно;
- підшипники на цапфах;
- аеродинамічна диспропорційність фаз роторів;
- тепловий дисбаланс роторів.

Вібрації з частотою, відмінною від частоти першої гармоніки обертання, можуть бути викликані наступними факторами:

- нерівномірний обтік повітря впускним отвором двигуна;
- нерівномірність процесів частини потоку двигуна (зміна тиску і температури повітря і газу в результаті недосконалості процесів, а також знос і пошкодження поверхні деталей);

- овальність опорних доріжок пластини, опір роторів та інші причини (ОСТ 26382-84). Крім того, вібрація низької частоти виникає при русі літака по злітно-посадочній смузі, посадці, при несприятливих метеоумовах польоту та ін.

На практиці вібрація авіаційного двигуна спричиняється одночасною дією кількох причин, найважливішою з яких є вібрація авіаційного двигуна з частотою першої гармоніки ротора, викликана масивним дисбалансом ротора двигуна.

Згідно з теорією Стодела, правильно збалансований обертовий вал у практичних умовах зберігає лінійну форму, тобто форму стійкої пружної рівноваги. Невеликі пружні коливання вала, що виникають унаслідок випадкових впливів, швидко гасяться, не спричиняючи помітного спотворення форми. За певних швидкостей обертання пряма форма перестає бути стійкою рівноважною формою.

Після відхилення вал не повертається у вихідне прямолінійне положення. Вигнутий вал буде обертатися навколо осьової лінії підшипника, зберігаючи свою вигнуту форму. Швидкість або число обертів, за яких відбувається це явище, називається критичною.

Відомо, що ротори авіаційних двигунів, які обертаються і є рухомими деталями, створюють доцентрове прискорення і, як наслідок, інерційні сили. Під час виготовлення рухомих частин двигуна практично неможливо забезпечити їхнє ідеальне балансування, тобто домогтися суміщення центру мас (ЦМ) з віссю обертання А-А' (рис. 1.2). Тому під час обертання виникає неврівноважена передавальна інерційна сила $F_c = m a_c$, яка спрямована від осі обертання по радіусу, що з'єднує ЦМ і вісь обертання, і змінює напрямок у просторі з кутовою швидкістю, що дорівнює частоті обертання вала двигуна. Ця сила діє на рухомі частини двигуна одночасно із силою ваги Р.

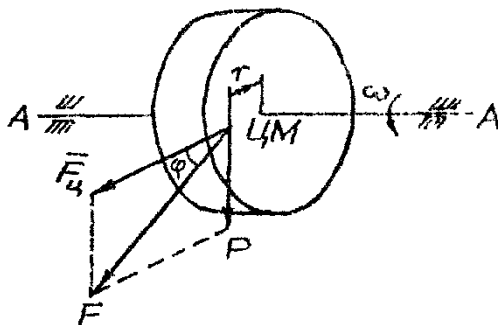


Рис. 1.2. Сили, що діють на ротори авіаційних двигунів

Тому на обертову частину двигуна діє сила $F = F_{ц} + P$, величина якої визначається рівнянням:

$$F := \sqrt{P^2 + Fv^2 + 2 \cdot P \cdot Fv \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)}, \quad (1.1)$$

або

$$F = m \sqrt{g^2 + \omega^4 r^2 + 2g\omega^2 \cos(\omega t + \varphi)}, \quad (1.2)$$

Як видно з рівняння, амплітуда цієї сили залежить від маси t деталі, що обертається, відстані r від ЦМ до осі обертання і квадрата частоти обертання і змінюється з часом за законом, близьким до закону косинус-синус. Фаза сили F , тобто її напрямок у кожен момент часу, залежить від початкової фази частоти обертання і часу, що минув від початку обертання.

Оскільки сила F змінюється за законом, близьким до гармонійного, то серед її складових більш значущою є перша гармоніка.

$$F_1 = F_{1a} \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.3)$$

Далі розглядається тільки дія сили F_1 , яка змінюється з частотою, що дорівнює частоті обертання рухомих частин двигуна. Під дією сили F_1 деталі, що обертаються, відчувають віброприскорення:

$$a = \frac{F_1}{m}, \quad (1.4)$$

Оскільки сила F_1 змінюється за гармонійним законом, коливальний рух деталі може бути описаний рівнянням:

$$s = S_a \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.5)$$

де Sa - амплітуда вібропереміщення відповідно до ГОСТ 24347 - 80.

Частота вібропереміщень (частота вібрації) відповідає частоті обертання ротора авіаційного двигуна тому частота вібрації турбореактивних і турбовентиляторних двигунів змінюється у визначеному діапазоні від $\omega_{\min} = \omega_{\text{МГ}}$ до $\omega_{\max} = \omega_{\text{зл}}$, де $\omega_{\text{МГ}}$, $\omega_{\text{зл}}$ - частота обертання ротора авіадвигуна на режимах малого газу і злітному відповідно (тяга цих двигунів змінюється за рахунок зміни частоти обертання ротора).

У турбогвинтових двигунах (ТГД) частота обертання ротора двигуна і частота обертання гвинта постійні, а тяга змінюється зі зміною кроку гвинта, тому, частота вібрації цих двигунів постійна. У ТГД вібрації двигуна відбуваються здебільшого на двох частотах через відмінності швидкостей обертання двох масових частин (ротора двигуна і гребного гвинта). Ротор двигуна обертається з набагато більшою швидкістю, ніж гребний гвинт, незважаючи на те, що гребний гвинт має більш розподілену масу і його складніше збалансувати, що призводить до підвищеної вібрації двигуна.

Як правило, вібропереміщення відбуваються відносно просторової кривої. Тому під час вивчення вібрацій розглядають складові вібропереміщень (вертикальна та горизонтальна складові), створювані силами (рис. 1.3), що діють по вертикалі F_y і горизонталі F_x , відносно осі обертання, і складова F_z (вертикальна складова вібропереміщення), що створюється силами, які діють уздовж осі обертання.

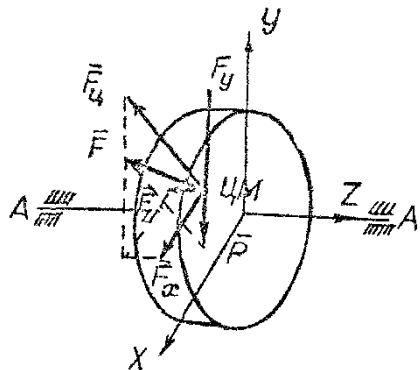


Рис. 1.3. Основні складові вібропереміщення

Найбільш інформативною величиною, що характеризує вібрацію, є віброприскорення, оскільки воно визначає додаткову силу, що діє на деталі двигуна. На практиці віброприскорення, що діє на двигун, характеризується коефіцієнтом віброперевантаження n , який являє собою відношення віброприскорення до прискорення вільного падіння.

Віброшвидкість найчастіше використовується для діагностики стану авіаційних двигунів, оскільки вона має прямий функціональний зв'язок із напруженнями, що діють на деталі двигуна.

Ефект лінійного перевантаження відповідає напругам в об'єкті. Статистичні навантаження повинні враховуватися під час розрахунку міцності об'єкта. У деяких випадках, здебільшого під час під'єднання до об'єкта силових ланцюгів, вплив лінійних перевантажень може призвести до порушень у роботі системи (наприклад, розмикання пружин електричних контактів, порушення роботи релейних пристроїв).

Вібраційні впливи є найбільш небезпечними для технічного обладнання. Напруги, що значно змінюються під дією вібрації, можуть спричинити накопичення ушкоджень у матеріалах, що призводить до утворення тріщин і руйнування. Крім тріщин, у механічних системах можуть спостерігатися й інші явища, спричинені впливом вібрації. Прикладом може слугувати поступове ослаблення нерухомих з'єднань. Вплив вібрації викликає незначні відносні зсуви сполучених поверхонь у з'єднаннях механічних деталей, що призводить до зміни структури поверхневих шарів сполучуваних деталей, зносу і, як наслідок, зменшення сили тертя в з'єднанні, зрушення власних частот тощо.

Якщо об'єкт має рухоме з'єднання (кінематичну пару в механізмі) із зазором, то вплив вібрації може викликати зіткнення сполучених поверхонь і призвести до руйнування.

У багатьох випадках руйнування об'єктів під дією вібрацій пов'язане з виникненням резонансних явищ. Тому під впливом кратних гармонік, які можуть

викликати резонанс об'єктів, найбільш небезпечні, і лабораторні випробування на вібростійкість об'єктів тому часто проводяться під впливом гармонік резонансних режимів. У складних об'єктах із широким діапазоном власних частот можливе одночасне збудження декількох резонансних мод під дією мультигармонійних збурень. У таких об'єктах неприпустимо замінювати мультигармонійні удари гармонійними.

Вібраційні удари можуть порушувати нормальне функціонування об'єкта, не спричиняючи його руйнування. Ця властивість механічних ударів проявляється в різних формах.

Наприклад, вібрації в металорізальних верстатах та іншому технічному устаткуванні, спричинені різними причинами, призводять до зниження точності та частоти обробки й інших порушень технічних процесів.

Вібрації в корпусі електрообладнання можуть спричинити різні несправності (наприклад, порушення контактних з'єднань, короткі замикання в неізольованих проводах тощо).

Вплив високих частот збуджує коливання в електродах і сітках електронних ламп. Це явище відоме як мікрофонний ефект і може порушувати нормальне функціонування пов'язаного з ними обладнання.

Вібрація суттєво впливає на точність роботи обладнання. Вплив вібрації може різко збільшити "прогин" гіроскопічного обладнання, що, своєю чергою, збільшує похибку вимірювань гіроскопічного обладнання. Обладнання, що містить вимірювальні прилади маятникового типу, схильне до зміщення нульового положення під впливом вібрації.

Відмова об'єкта, що не супроводжується руйнуванням або іншими незворотними змінами, називається пробоем. Таким чином, механічний удар може спричинити як руйнування, так і відмову машин, приладів та апаратів. Здатність об'єкта не руйнуватися від механічного удару називається віброміцністю, а здатність нормально функціонувати - вібростійкістю. Метою віброзахисту

технічних об'єктів є підвищення їхньої віброміцності та вібростійкості. Для авіаційної промисловості перспективним є вимірювання параметрів вібрації авіаційних двигунів в авіаремонтних майстернях і перевірка вібростійкості систем та агрегатів на етапі доопрацювання та випробувань. Інтелектуальні системи діагностики повинні контролювати параметри вібрації авіоніки.

Усі машини піддаються впливу динамічних сил. Ці сили не тільки спричиняють шум і вібрацію, а й призводять до несправностей, які змінюють характеристики сил і відповідно змінюють характеристики шуму і вібрації. Діагностика працездатності машини без зміни режиму її роботи - це дослідження динамічних сил, а не вібрації чи шуму як таких. Останні лише містять інформацію про динамічні сили, до того ж частина інформації втрачається в процесі перетворення сил на вібрацію і шум. Ще більше інформації втрачається при перетворенні сил і здійснюваної ними роботи в теплову енергію. Саме тому вібрація є кращим із двох типів сигналів (температура і вібрація) під час діагностики.

Основні рушійні сили, що діють на механізми, які обертаються, та спричиняють вібрацію і шум, перелічено в табл. 1.1.

Основні джерела вібрації літальних апаратів

Таблиця 1.1

| Сила, що породжує вібрацію | Джерела вібрації |
|------------------------------|--|
| 1. Механічної природи | |
| Відцентрова | Неврівноваженість ротора |
| Кінематична | Нерівність поверхні |
| Параметрична | Флуктуації жорсткості валу, підшипників і т.д. |
| Сила тертя | Вузли тертя кочення і ковзання |
| Биття | Дефектні поверхні тертя |

| 2. Електромагнітної природи | |
|---|--|
| Магнітна | Флуктуації об'єму повітряного зазору в магнітопроводі |
| Електродинамічна | Змінні складові струму і потоку |
| Магнітострикційна | Ефект магнітострикції в магнітопроводі |
| 3. Гідро(аеро)динамічної природи | |
| Підйомна (обтікання) | Рух лопасті в неоднорідному потоці або групи неоднакових лопастей в однорідному потоці |
| Сила тертя | Межа потоку і нерухомі частини |
| Пульсації тиску | Турбулентність потоку, зрив вихорів, кавітація |

До сил механічного характеру належать:

- відцентрові сили, зумовлені дисбалансом деталей, що обертаються;
- кінематичні сили, зумовлені нерівностями поверхонь, що взаємодіють, зокрема, поверхонь тертя підшипників;
- параметричні сили (в основному складові зміни жорсткості деталей, що обертаються);
- сили тертя. Вони не завжди можуть розглядатися як механічні, але практично завжди вони є результатом сумарної дії низки мікроударів з деформацією (пружною) контактної мікронеоднорідності поверхонь тертя;
- ударні сили, що виникають у результаті взаємодії окремих фрикційних елементів із пружною деформацією.

До електромагнітних сил походження в електричних машинах належать такі:

- магнітні сили, що визначаються зміною магнітної енергії в певному

обмеженому просторі, зазвичай в обмеженій області повітряного зазору;

- електродинамічні сили, зумовлені взаємодією магнітних полів і струмів;
- магніострикційні сили: магніострикційні ефекти, тобто сили зумовлені зміною лінійних розмірів магнітного матеріалу під дією магнітного поля.

До аеродинамічних сил належать:

- підйомні сили. Сили тиску на об'єкти, тобто лопатки робочого колеса, що рухаються в потоці, або лопатки робочого колеса, що обтікаються потоком;
- сили тертя на межі розділу між потоком і нерухомими частинами машини (наприклад, внутрішніми стінками трубопроводу);
- коливання тиску в потоці, викликані турбулентністю потоку, зривом вихорів.

1.2. Системи контролю параметрів вібрації

Сучасні авіаційні двигуни є дорогими, енергоємними та високонавантаженими компонентами літальних апаратів, які працюють в умовах високих теплових і силових навантажень, що забезпечують високі економічні показники, і тому потребують особливої уваги до забезпечення надійності двигуна в польоті.

Тому потрібна особлива увага до забезпечення надійності двигуна в польоті. У практиці експлуатації найбільшого розвитку набули системи, що використовують бортовий контроль і зберігання даних про технічний стан двигуна, які дають змогу оцінювати справність, ефективність, правильність функціонування та усунення несправностей знімних вузлів.

Ефективність розробленої системи параметричного контролю та діагностики визначається:

- достатньою керованістю двигуна та адаптивністю до об'ємної діагностики для забезпечення виявлення несправностей і контролю технічного стану в польоті;
- наявністю потужної та надійної БСК параметрів, здатної відслідковувати стан двигуна та його функціональних систем на різних режимах;

- наявність методів і засобів діагностики з високою роздільною здатністю, що забезпечують раннє виявлення несправностей у міру їх виникнення і в процесі експлуатації;
- розроблення системи ухвалення рішень щодо можливості використання неруйнівних методів і засобів експлуатації двигуна, пошуку несправностей, управління та регулювання двигуна;
- високий професійний рівень знань у галузі діагностики та обслуговування двигунів;
- здатність постійно нарощувати і вдосконалювати засоби і методи контролю та діагностики обладнання.

Одним із способів зниження вартості обслуговування і ремонту двигуна при забезпеченні необхідного рівня надійності є можливість проведення перевірок і поточного ремонту без зняття двигуна, а також легка і швидка заміна двигуна в разі потреби. У разі використання систем комплексної діагностики для технічного обслуговування за станом із контролем параметрів застосування трудомістких неруйнівних методів контролю регламентується системою діагностики.

Подальший розвиток методів і засобів контролю забезпечує не тільки можливість оцінювання працездатності або ремонтпридатності елемента в момент контролю, а й можливість глибшого аналізу його технічного стану та прогнозування змін у наступні періоди експлуатації, що дає змогу використовувати в практиці експлуатації третій вид граничних станів - передовідмовний стан і параметричний контроль. З'являється можливість використання стратегій технічного обслуговування (експлуатації) у станах, які включають

У сучасних конструкціях двигунів застосовують складні системи контролю, виявлення і розпізнавання несправностей у польоті та під час технічного обслуговування. Ці системи збирають інформацію про роботу двигуна в польоті, реєструють її в МСРП і в міру необхідності видають інформацію про

несправності у вигляді індикаторів пілотажного монітора і друкованих матеріалів.

Перевірка працездатності системи газотурбінного двигуна здійснюється на борту літака за допомогою вбудованого блока керування і на землі за допомогою автоматизованого оброблення польотної інформації, записаної на магнітні носії.

Сучасні стратегії технічного обслуговування і ремонту газотурбінних двигунів передбачають моніторинг і управління процесом технічного обслуговування авіаційних газотурбінних двигунів, індивідуальний контроль технічного стану двигуна і проведення тривалих робіт з технічного обслуговування (огляди, регулювання) тільки в міру необхідності за допомогою системи "параметричного контролю стану". Система включає в себе впровадження "системи технічного обслуговування двигуна".

Інформація про технічний стан отримується шляхом вимірювання функціональних і діагностичних параметрів. Вимірювання проводять періодично в тому режимі роботи двигуна, який найсприятливіший для діагностованої системи, у польоті або під час проведення різних видів технічного обслуговування. Для цього використовують дані, що реєструються стандартними авіаційними приладами, засобами автоматичного керування двигуном, апаратурою технічного діагностування, приладами неруйнівного контролю, журналами і спеціальними картами контролю параметрів.

Для безперервного контролю та аналізу технічного стану авіаційних двигунів і запобігання відмовам у польоті використовують методи літакового і наземного контролю, діагностики та автоматичного діагностування несправностей газотурбінних двигунів. До таких методів належать автоматична реєстрація та візуальний контроль параметрів і сигналів, методи явного опрацювання даних для оперативного контролю та раннього виявлення несправностей, методи діагностики проточної частини за теплогазодинамічними параметрами, методи контролю контурів паливної та масляної систем, вібродіагностика, акустична та теплова

діагностика. Діагностика проточної частини двигуна за термогазодинамічними параметрами ґрунтується на аналізі відхилень параметрів, спричинених виникненням несправностей, від еталонних значень, діагностичних ознак (ККД компонентів, коефіцієнт сумарного перепаду тиску) та спеціальних параметрів (час вибігу ротора, перепад температур під час пуску, час реверсу обертів, час реакції механізації компресора) на основі аналізу тенденцій зміни часу потоку, що набігає.) на основі аналізу трендів. Цей метод дає змогу виявити прогар, перекіс, пошкодження ущільнень, залишкову деформацію жарових труб камер згоряння і сопел турбін, корозійно-ерозійні пошкодження лопаток турбокомпресора, руйнування елементів системи протизатоплення, забруднення проточної частини та інші несправності.

Вібродіагностика газотурбінних двигунів дає змогу виявити підвищений дисбаланс ротора в процесі експлуатації внаслідок пошкодження лопаток, руйнування опорних елементів і підвищеного зносу опорних підшипників ротора. Спеціальні засоби вібродіагностики, призначені для спектрального аналізу вібрацій, дають змогу виявити несподівані режими роботи шестерень і шліцьових з'єднань, збільшення зазорів у підшипниках і закоксування паливних форсунок, що призводить до вібраційного згоряння палива.

Існує тісний взаємозв'язок між інтенсивністю зносу деталей газотурбінних двигунів, що очищаються маслом, і накопиченням у маслі продуктів зносу, а також зміною його фізико-хімічних властивостей, що робить масло цінним носієм діагностичної інформації.

Багато конструктивних елементів газотурбінних двигунів (лопатки, диски, вали роторів тощо) піддаються тепловим і силовим навантаженням, які накопичують потенційні пошкодження матеріалів деталей і призводять до утворення макроскопічних тріщин. У зв'язку з тим, що стадія накопичення прихованих ушкоджень до появи видимих тріщин становить 90% до повного руйнування, розсіяні ушкодження, які виникають, не можуть бути виявлені візуально і

достовірно оцінені жодним із методів неруйнівного контролю. Технічний стан таких вузлів можна оцінити чисельними методами, що контролюють витрату ресурсів. Цей метод враховує основні фактори навантаження, міцнісні властивості та використовує одну з теорій підсумовування пошкоджень.

Найдоцільнішим методом використання ресурсу авіаційного двигуна є визначення терміну служби за фактичним станом його основних вузлів і елементів. Визначення ресурсу за станом дає змогу максимально використовувати резерви працездатності елементів, закладені в їхню конструкцію, що дає максимальний економічний ефект за збереження високої надійності двигуна в процесі експлуатації.

Система контролю ресурсу двигуна дає змогу встановлювати індивідуальний ресурс і термін служби двигуна на основі аналізу його технічного стану.

Оскільки система управління технічним обслуговуванням (СУТО) авіаційних газотурбінних двигунів в експлуатуючих організаціях є складовою частиною системи управління польотами і технічним обслуговуванням повітряних суден (СУПТО ПС), більшість модулів СУТО газотурбінних двигунів функціонують у рамках СУТО ПС. Тому більшість модулів MMS для газотурбінних двигунів працюють у складі AFMMS. До основних модулів належать модулі розрахунку доступності компонентів і контролю стану літака, модулі розрахунку часу безвідмовної роботи і ресурсів, модулі розрахунку несправностей і відмов, модулі контролю руху обертових запасів і запасних частин, модулі контролю виробітку фактичних ресурсів, модулі бюлетенів, модулі розрахунку та контролю бюлетенів, модулі активності та удосконалення двигунів, модулі управління процесом технічного обслуговування і ремонту, модулі використання парку газотурбінних двигунів.

До основних модулів SCADA авіаційного газотурбінного двигуна належать:

- система параметричного моніторингу та діагностики двигуна (MPDS);
- система збору та обробки даних про відмови і несправності;

- система пошуку та усунення несправностей двигуна
- системи контролю ресурсу і характеристик надійності;
- системи інформаційної підтримки процесів технічної експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів.

Система управління виробництвом у цеху технічного обслуговування авіаційної техніки являє собою складну багаторівневу систему, що являє собою сукупність замкнутих контурів управління, ієрархія яких визначається виробничою структурою цеху технічного обслуговування авіаційної техніки. Контур управління технічним обслуговуванням авіаційних двигунів вельми обширний і охоплює як структурні підрозділи авіаційно-технологічного комплексу (цехи оперативного і планового ремонту, діагностичні лабораторії, планово-диспетчерські відділи), так і розробників авіаційних двигунів, які розробляють заходи й удосконалення, встановлюють та нарощують ресурси для контролю й управління технічним станом, надійністю й термінами служби.

У єдиній інформаційній інфраструктурі компанії найоперативнішими та найдостовірнішими джерелами інформації про технічний стан двигунів є цехи експлуатації та планово-попереджувального ремонту, льотний склад, який безпосередньо одержує інформацію про технічний стан у процесі польоту, експлуатації й технічного обслуговування, а також діагностичні лабораторії, які одержують та опрацьовують польотну й експлуатаційну інформацію з магнітних пристроїв, що реєструють. Загальна ефективність систем і засобів автоматизації управління процесами технічного обслуговування в авіакосмічній промисловості залежить від ступеня автоматизації збирання, оброблення та передавання інформації в процесі експлуатації, під час технічного обслуговування газотурбінних двигунів і під час виробничого контролю.

Основною ланкою в системі управління станом авіаційного двигуна є діагностична лабораторія (центр обробки та аналізу інформації). У цю лабораторію надходить уся інформація про технічний стан двигуна від цехів технічного

обслуговування, ТОiP, екіпажу, інших служб авіаційного комплексу і виробника двигуна, а також проводиться первинний аналіз цієї інформації.

Інформаційні масиви, що зберігаються в діагностичній лабораторії, дають змогу централізувати дані від усіх видів ресурсів і функцій управління (надійність, ресурс, технічний стан) і можуть створити умови для системної організації управління виробництвом, на відміну від задачного підходу в АСУ.

Організація системи збору та обміну первинною інформацією, що зберігається в центральній базі даних діагностичних лабораторій, оперативний аналіз та узагальнення досвіду експлуатації за типами або окремими екземплярами газотурбінних двигунів, що забезпечуються новими інформаційними технологіями, можуть бути використані для інжинірингу, матеріально-технічного забезпечення експлуатації протягом усього терміну служби та нормативного забезпечення, створюючи необхідні умови для безпосередньої участі розробників, виробників, постачальників комплектації, а також для забезпечення надійності.

Це необхідно для постійного контролю надійності повітряних суден, забезпечення того, щоб інтенсивність відмов не перевищувала гранично допустимих значень, запобігання масовим відмовам і скорочення напрацювання повітряних суден.

Системи параметричного контролю та діагностики газотурбінних двигунів призначені для оцінки технічного стану в процесі експлуатації, виявлення та попередження відмов двигуна й основних функціональних систем у польоті PDCS містить: автоматичну реєстрацію параметрів і сигналів, які реєструють на магнітометрі; явне опрацювання після кожного польоту, що містить моніторинг і аналіз інформації з використанням параметричної діагностики. Система дає змогу оперативно оцінювати поточний стан двигуна, функціональних систем (пускової, паливної, масляної, механізації компресора, реверсу тяги тощо), діагностувати вібрації двигуна на всіх режимах роботи та аналізувати часові параметри. Для оцінки поточного стану технічного стану використовуються логічний аналіз

параметрів і сигналів, експресивний аналіз польотної та ходової інформації та візуальний контроль параметрів і сигналів. Для середньострокової оцінки та прогнозування роботи двигуна використовують трендовий аналіз, що дає змогу встановити залежність зміни параметрів від часу роботи та визначити тенденції перевищення граничних рівнів. Комплексний аналіз польотної інформації в діагностичній лабораторії дає змогу класифікувати двигуни як "ремонтпридатні" та "підозрілі на несправність", виявляти несправності у функціональних системах двигуна і в системі контролю та реєстрації параметрів, ухвалювати обґрунтовані рішення щодо технічного стану двигуна, необхідних замін, перевірок і регулювань, автоматичного виявлення несправностей. Система дає змогу реалізувати таке.

До складу СПКД входять такі основні комплекси задач і програми обробки інформації:

- комплекс задач для явного аналізу технічного стану газотурбінних двигунів із підвищеною керованістю за даними польоту;
- комплекс задач з опрацювання та аналізу роботи двигуна; і
- система комплексного діагностування двигуна за вимірюваними параметрами;
- експертні системи, що ухвалюють рішення про технічний стан двигуна, здійснюють пошук несправностей і розроблення методик їх усунення;
- комплекс завдань із розрахунку та контролю напрацювання і фактичного ресурсу поточних і порівнюваних двигунів;
- комплекс завдань з контролю повідомлень бортової системи управління двигуном (БСУД);
- комплекс завдань з відображення та візуалізації польотної інформації;
- комплекс завдань із реєстрації та управління даними про несправності та заходи щодо їх усунення;
- термодинамічні моделі двигунів для діагностики газотурбінних двигунів;

- комплекс завдань з контролю витрат палива;
- комплекс задач з оцінки технічного стану маслосистеми двигуна;
- програма для розрахунку тяги двигуна і питомої витрати палива;
- комплекс задач з контролю вібраційного стану силової установки літака;
- серія задач з формування та ведення паспортних даних і переміщень двигуна в процесі експлуатації;
- комплекс завдань з формування та ведення паспортів двигунів;
- комплекс завдань з формування та ведення зауважень екіпажу та діагностичної лабораторії;
- комплекс завдань зі створення та ведення кодифікаторів електронних каталогів авіаційних газотурбінних двигунів; класифікаторів, які використовуються в інтегрованих системах інформаційної підтримки технічної експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів; нормативних, довідкових і керівних документів.

З алгоритмічного погляду всі завдання інтегрованої автоматизованої системи параметричного контролю та діагностики технічного стану авіаційних газотурбінних двигунів поділяються на групи, що включають завдання оперативного оцінювання технічного стану, діагностики та прогнозування, пошуку несправностей та інформаційної підтримки.

Основна група завдань оперативного оцінювання технічного стану авіаційного двигуна містить завдання моніторингу повідомлень BSCD, представлення та аналізу польотної інформації, оброблення та аналізу прогонів, а також відображення та візуалізації польотної інформації. Завдання цієї групи керують роботою двигуна і його систем на всіх режимах у польоті відповідно до польотної інформації, записаної в МСРП-А-02.

Серія завдань, що керують повідомленнями BSCD, забезпечує контроль параметрів і сигналів, що реєструються в польоті. Для контролю параметрів використовуються спеціальні алгоритми з фіксованими і плаваючими обмеженнями.

Він заснований на порівнянні поточного значення параметра з його граничним значенням, водночас фізичні (газодинамічні) і логічні залежності між параметром і його граничним значенням визначаються станом двигуна і його функціональних систем. Контроль сигналів реалізує алгоритм логіко-часового аналізу подій, який фіксує важливі події, що стосуються несправного стану двигуна та його систем, а також несправностей окремих елементів (датчиків, блоків) на основі стану набору сигналів протягом заданої тривалості.

При цьому серія завдань моніторингу повідомлень БСКД забезпечує збереження в постійній пам'яті комп'ютера переліку підтверджених подій, зареєстрованих БСКД-90, для виявлення відмов і несправностей, перевірки правильності формування повідомлень про події та подальшого детального аналізу. Основний процес контролює таке:

- сигнали несправностей від датчиків і блоків БСКД-90;
- сигнали несправності двигуна
- якщо параметр перевищує "плаваюче" граничне значення;
- якщо параметр перевищує "фіксоване" граничне значення;
- граничне положення вхідного направляючого ножа
- положення клапана пуску повітря через проміжний ступінькомпресора високого тиску;
 - положення клапана впуску повітря через ступінь утримання;
 - положення елемента реверсивного пристрою;
 - перемикання повітрязабірника в положення POS і продування вихору від 13-го ступеня до 6-го ступеня компресора високого тиску;
 - час пуску і роботи;
 - стан системи охолодження турбіни
 - сигнали про несправності інших елементів двигуна ПС-90А;
 - етапи польоту для накопичення інформації з характерних ділянокдля подальшого

аналізу і порівняння.

Для оперативного керування двигуном і його функціональними системами на всіх режимах роботи в польоті розроблено серію задач оперативного аналізу польотної інформації. Отримано параметри для основних сталих і перехідних режимів роботи двигуна. У польоті, під час запуску, на режимі малого дроселя, на режимі малого дроселя перед зльотом, на злітному режимі, під час набору висоти, крейсерському режимі, спуску, гальмуванні, зупинці двигуна, параметри газовиділення, час запуску, механічна швидкість роботи компресора, клапан запуску повітря, час вибігу ротора, температура під час запуску та реверсу тяги. Контролюється робота двигуна, включно зі спуском, параметри системи змащення і вібраційний стан опори ротора. Під час перевірки перевіряється правильність роботи основних функціональних систем двигуна (пуск, механізація компресора, реверс тяги, охолодження лопатей, паливна і масляна системи двигуна). До комплексу завдань також входить вимірювання напруцювання двигуна, прямої витрати палива і питомої витрати палива на різних режимах і протягом усього польоту.

Контроль параметрів і сигналів двигуна супроводжується обробленням та аналізом польотної інформації. При цьому інформація про параметри польоту записується в спеціальні файли для подальшого аналізу тенденцій між польотами і технічного стану двигуна на пункті управління польотом.

До комплексу завдань, пов'язаних з керуванням і діагностикою двигуна за параметрами польоту, входять завдання аналізу трендів параметрів проточної частини, керування масляною системою, витрати палива, тяги і діагностики вібрації двигуна. До нього також входить програма розрахунку параметрів моделі на основі теплогазодинамічної моделі двигуна, яка використовується в процесі параметричної діагностики. Ці завдання використовуються для оцінки та прогнозування технічного стану двигуна на середньострокову перспективу.

До групи інформаційних завдань входять завдання реєстрації та ведення паспортних і формулярних даних двигуна, експлуатаційних переміщень, даних про

несправності, поточне та еквівалентне напрацювання, зауважень екіпажу і лабораторії. Дані про несправності та способи їх усунення, а також зауваження екіпажу і лабораторії використовуються для вирішення завдань пошуку несправностей спільно з експертною системою прийняття рішень про технічний стан газотурбінного двигуна.

Систему параметричного контролю та діагностики реалізовано у вигляді розподіленого обчислювального комплексу, що охоплює різні служби експлуатуючої організації, на базі локальної обчислювальної мережі з можливістю розподіленого оброблення даних.

Центральна інформаційна інфраструктура експлуатуючих організацій розміщується на потужних комп'ютерах (файлових серверах). Доступ до центральної інформаційної інфраструктури забезпечують інші комп'ютери, підключені до мережі через мережеві адаптери. Файл-сервер здійснює вибірку і попередню обробку даних. Остаточне опрацювання та подання даних відбувається на IBM-сумісній робочій станції на базі ПК із процесором не нижче 80486DX, 16 Мб ОЗП, 540 Мб HDD і SVGA-монітором. Перевага централізованого зберігання баз даних полягає в полегшенні обслуговування, забезпеченні цілісності бази даних, організації архівування та резервного копіювання інформації.

Поєднання централізованого зберігання і розподіленого оброблення інформації значно підвищує загальну ефективність системи і знижує її вартість.

Поява двигунів з поліпшеною керованістю і розвиток наземних автоматизованих систем контролю і збору польотної інформації створили нові можливості для оперативної та всебічної оцінки технічного стану авіаційних двигунів, що забезпечує їх експлуатацію відповідно до технічного стану.

РОЗДІЛ 2. ОБГРУТУВАННЯ БЕЗКОНТАКНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ

2.1. Класифікація існуючих віброперетворювачів

Джерелом сигналу вимірювальної інформації про значення вимірюваного параметра вібрації є віброперетворювач (віброперетворювач). Сучасні віброперетворювачі засновані на принципі електричного вимірювання переважно неелектричних величин (сигналів), коли механічні коливання перетворюються в електричні.

Вібровимірювальні перетворювачі можна класифікувати за кількома незалежними ознаками:

- за призначенням - віброперетворювачі можуть використовуватися для вимірювання різних параметрів вібрації. Залежно від вимірюваного параметра вібрації віброперетворювачі називаються акселерометрами - для вимірювання прискорення, перетворювачами швидкості - для вимірювання швидкості.

- залежно від зв'язку (взаємодії) між віброчутливою (чутливою) частиною та об'єктом, що вимірюється, розрізняють контактні та безконтактні перетворювачі. Розмір і маса об'єкта визначають, які перетворювачі будуть використовуватися - контактні або безконтактні. Якщо розміри і маса об'єкта пропорційні або менші за розміри і масу контактного перетворювача, то слід використовувати безконтактний вимірювальний перетворювач.

- згідно з принципом вимірювання на системах відліку, вимірювальні перетворювачі можуть бути засновані на: визначенні координат окремих точок виробу нерухомої системи відліку, у якій проводять спостереження, - кінематичний

принцип: штучнанерухома система відліку у вигляді інерційних елементів, сполучених із віброуючимоб'єктом через пружну підвіску (м'які пружини).

- динамічний принцип. За реалізації динамічного принципу вимірювання параметрів коливань об'єкта, що виконуються в умовах усталеного процесу, є абсолютними щодо інерційного елемента.

- за принципом перетворення механічних коливань в інші види вібрації розрізняють активні та пасивні вимірювальні перетворювачі. В активних вимірювальних перетворювачах вихідний сигнал формується за рахунок вхідної механічної енергії та джерела постійної енергії. До активних перетворювачів належать фотоелектричні, гамма-випромінювальні та ємнісні перетворювачі. У пасивних перетворювачах вихідний сигнал формується тільки за рахунок вхідної механічної енергії. До пасивних перетворювачів належать п'єзоелектричні та електретні.

- залежно від типу вимірюваної компоненти вібрації розрізняють перетворювачі для вимірювання лінійної компоненти вібрації (одно-, дво- і трикомпонентні) і для вимірювання кутової компоненти.

- залежно від напрямку сили, прикладеної в процесі механічного впливу, розрізняють вимірювальні перетворювачі спрямованої дії та ненаправленої дії. У всеспрямованих інерційних перетворювачах пружний підвіс забезпечує збереження положення й орієнтації в абсолютному просторі. Тому можуть генеруватися всі шість складових вібрації. Спрямовані перетворювачі вимірюють тільки одну лінійну або кутову складову вібрації.

- залежно від фізичних явищ вимірювальні перетворювачі можна поділити на такі основні групи: механічні, акустичні (ультразвукові), електричні, електромагнітні (радіотехнічні), оптичні (оптичні) та радіаційні.

Таким чином, перераховані вище перетворювачі для вимірювання вібрації можна розділити за призначенням на такі типи: перетворювачі абсолютної вібрації:

генераторні:

- п'єзоелектричні перетворювачі;
- індуктивні;
- засновані на ефекті Холла;

параметричні:

- резистори;
- п'єзорезистори;
- індуктивні;
- трансформатори;
- магнітопружні;
- ємнісні;
- електронно-механічні;
- вібраційно-частотні;
- гранично-контактні;
- імпедансні.

2. Безконтактні вимірники відносної вібрації:

- магнітні;
- радіочастотний;
- електромагнітний;
- акустичний;
- радіаційні;
- оптичне.

Безконтактні віброметри реалізують кінематичні методи вимірювання відносних параметрів вібрації з використанням електромагнітних полів, наприклад оптичних радіохвиль. Найширше в безконтактній вібродіагностиці застосовують оптичні методи та засоби вимірювання параметрів вібрації, які залежно від способу вилучення інформації про вимірювані параметри можна розділити на амплітудні та частотні. До амплітудних методів вимірювання належать фотоелектрометрія,

дифракційні вимірювання, інтерферометрія та методи, що використовують просторову модуляцію світлового потоку.

Вимірювання коливальних параметрів, засноване на вимірюванні частоти відбитого від об'єкта випромінювання генератора фотонів, здійснюється приладами, заснованими на ефекті Доплера.

Існує два типи пристроїв, що перетворюють параметри коливань на електричні сигнали: генераторні, що перетворюють енергію механічних коливань на електричну енергію, і параметричні, що перетворюють механічні коливання на зміну параметрів електричного кола (індуктивності, ємності, активного опору, частоти, фазового зсуву тощо) Параметричні.

П'єзоелектричні та електродинамічні перетворювачі використовуються здебільшого для вібродіагностики машин і механізмів і називаються генераторними, а індуктивні, вихрострумові та ємнісні перетворювачі також застосовуються і називаються параметричними.

П'єзоелектричні перетворювачі використовуються для вимірювання абсолютних параметрів вібрації частин механізму, що не обертаються. П'єзоелектричні перетворювачі мають високі вимірювальні характеристики, широкий діапазон амплітуд і частот, високу надійність і відносно невисоку вартість. Їхніми основними недоліками є високий вихідний опір і низька завадозахищеність. Ці недоліки певною мірою притаманні і п'єзорезистивним перетворювачам, які належать до класу параметричних перетворювачів.

Прості п'єзорезистивні перетворювачі можуть бути представлені у вигляді пластин із кварцу або штучної п'єзоелектричної кераміки. Для їх виготовлення використовують цирконат-титанат свинцю (ЦТС) і титанат вісмуту (ВТ). На один бік пластини встановлюється елемент, що сприймає зовнішні коливання, а на інший - маса m . Власні частоти сейсмічних систем таких перетворювачів.

$$f_0 = (1/(2H))(c_1/m)^{1/2}, \quad (2.1)$$

де c_1 — коефіцієнт пружності п'єзоелемента у напрямі додатку сили інерції вантажу масою m .

У частотному діапазоні $f_i \ll f_0$ на виході перетворювача утворюється заряд $q(t)$, який пропорційний прийнятому віброприскоренню $a(t)$:

$$q(t) = d_{11} k a(t), \quad (2.2)$$

де d_{11} і k – п'єзомодуль і коефіцієнт перетворення відповідно.

Кількість заряду $q(t)$ перетворюється на напругу або струм.

Під час вибору п'єзоелектричного перетворювача для конкретного випробування необхідно враховувати температуру, діапазон амплітуд і частот, коефіцієнт перетворення і частоту настановного резонансу.

Електрокінетичні перетворювачі використовують для вимірювання параметрів вібрації в діапазоні частот від 1 Гц до 2 кГц.

Електрокінетичні перетворювачі містять магнітну систему з котушкою дроту в зазорі. Магнітна система зазвичай закріплена на основі, а котушка жорстко пов'язана із сейсмічною масою.

Під дією зовнішньої вібрації $e(t)$ і відносно вібрації $x(t)$ у котушці виникає електрорушійна сила

$$e(t) = B W l_{cp} (dx(t)/dt), \quad (2.3)$$

де B, W, l_{cp} — магнітна індукція в зазорі, число витків і середній діаметр витка рухомої котушки відповідно.

Електрокінетичні перетворювачі працюють на частоті, що значно перевищує власну частоту сейсмічної системи, тобто $\gamma \gg 1$.

Електрорушійна сила на виході котушки пропорційна віброшвидкості гармонійних коливань:

$$e(t) = k \omega e_a \cos \omega t, \quad (2.4)$$

де $k = B W l_{cp}$.

Під час роботи електродинамічного перетворювача в першому діапазоні частот $\gamma \ll 1$ електрорушійна сила на його виході буде пропорційна різкості

$$e(t) = k (d^3 e(t)/dt^3), \quad (2.5)$$

До переваг електродинамічних датчиків вібрації належать широкий амплітудний діапазон, низький вихідний імпеданс і можливість передавання сигналів довгими лініями зв'язку.

Більшість параметричних перетворювачів працюють на основі зміни комплексного опору або провідності в електричному ланцюзі.

Найчастіше використовують перетворювачі індуктивного, трансформаторного, вихрострумowego, магнітопружного, механотронного та ємнісного типів.

2.2. Методи вібродіагностики

Існують дві групи методів вимірювання параметрів вібрації: контактні, за яких датчик механічно з'єднується з об'єктом, і безконтактні, за яких механічний зв'язок з об'єктом відсутній.

Розглянемо спочатку контактний метод. Найпростішим методом є використання п'єзоелектричного датчика для реєстрації вібрацій. Хоча він здатний з високою точністю вимірювати в низькочастотному діапазоні за відносно великих амплітуд коливань, він не може вимірювати високочастотні та низькоамплітудні коливання через велику інерційність і спотворення форми сигналу. Крім того, якщо маса вимірюваного об'єкта, а отже, і його інерція, невелика, такі датчики можуть істотно впливати на характер вібрації, що призводить до додаткових похибок вимірювань.

Метод відкритого резонатора дає змогу усунути ці недоліки. Суть методу полягає у вимірюванні параметрів НВЧ-резонатора, які змінюються під дією коливань досліджуваного об'єкта. Резонатор має два дзеркала, одне з яких нерухоме, а інше механічно пов'язане з об'єктом. Зсув за малих амплітуд коливань реєструють амплітудним методом, заснованим на зміні вихідної потужності. Цей метод вимагає постійної потужності, що підводиться до резонатора, і високої стабільності частоти збудження.

За великої амплітуди коливань реєструється зсув резонансної частоти, що може бути виконано з дуже високою точністю. Для збільшення коефіцієнта добротності та зменшення дифракційних втрат використовують сферичні дзеркала.

Роздільна здатність цього методу становить 3 мкм. Цей метод має меншу інерційність, ніж описані вище методи, але рекомендується до застосування в тих випадках, коли маса дзеркала істотно менша за масу досліджуваного об'єкта.

Однак, оскільки механічне з'єднання датчика з об'єктом дослідження не завжди прийнятне, основна увага останніми роками приділяється розробленню безконтактних методів вимірювання параметрів вібрації. Крім того, їхніми загальними перевагами є відсутність впливу на досліджуваний об'єкт і незначна інерційність.

Усі безконтактні методи вимірювання здійснюють зондування об'єктів на основі звукових та електромагнітних хвиль.

Одним із нещодавно розроблених методів є ультразвукове фазове вимірювання. При цьому вимірюється поточне значення різниці фаз між опорним сигналом ультразвукової частоти та сигналом, відбитим від досліджуваного об'єкта. Як чутливий елемент використовується п'єзокераміка.

Для ультразвукової частоти 240 кГц чутливість вимірювання вібропереміщень становить 10 мкм; у діапазоні 10^{-5} до 10 мкм відстань до об'єкта становить близько 1,5 м. Для частоти 32 кГц чутливість становить 30 мкм, а відстань до об'єкта -

близько 2 м. Чутливість п'єзокераміки становить близько 1 мкм. Зі збільшенням частоти зондувального сигналу чутливість зростає.

Перевагами цього методу є дешевизна і компактність обладнання, малий час вимірювання, відсутність обмежень на зменшення частотного діапазону і висока точність вимірювань низькочастотної вібрації. Недоліками є високе загасання ультразвукових хвиль у повітрі, залежність від атмосферних умов і зниження точності вимірювань зі зростанням частоти вібрації.

Широко використовуються методи зондування об'єктів за допомогою видимого світла. Усі оптичні методи можна розділити на дві групи. До першої групи належать методи, засновані на реєстрації ефекту Доплера. Найпростішими є гомодинні методи, які дають змогу вимірювати амплітуду і фазу гармонійних коливань, але не можуть досліджувати ангармонійні або великоамплітудні коливання. Ці недоліки можуть бути усунені за допомогою гетеродинного методу. Однак він вимагає калібрування і, крім того, вимірювальна апаратура дуже складна.

Серйозним недоліком перерахованих методів є високі вимоги до якості поверхні досліджуваного об'єкта. Однак це втрачає свою значущість у разі використання голографічних методів, які становлять другу групу.

Голографічні методи мають високу роздільну здатність (до 0,05), але потребують складного і дорогого обладнання. Крім того, час вимірювання дуже великий. Загальними недоліками оптичних методів є складність, громіздкість і висока вартість обладнання, велике енергоспоживання, високі вимоги до якості поверхні досліджуваного об'єкта і високі вимоги до атмосфери (постійна вологість, відсутність пилу тощо). Крім того, лазерне випромінювання згубно впливає на зір оператора, що вимагає додаткових запобіжних заходів і захисту.

Деякі з цих недоліків можуть бути усунені шляхом застосування методів, заснованих на використанні НВЧ-випромінювання. Їх можна розділити на інтерферометричні та резонаторні. Інтерферометрія ґрунтується на зондуванні

досліджуваного об'єкта хвилями ВЧ- і НВЧ-діапазону, прийомі та аналізі відбитих (розсіяних) об'єктом хвиль. У результаті інтерференції між випромінювачем і досліджуваним об'єктом утворюються стоячі хвилі. Коливання об'єкта викликають амплітудну і фазову модуляцію відбитих хвиль, формуючи сигнал биття. Амплітуда виділеного змінного сигналу пропорційна вібропереміщенню, а частота відповідає частоті коливань об'єкта.

Резонаторний метод ґрунтується на поміщенні вібруючого об'єкта в поле (зовнішнє або внутрішнє) НВЧ-резонатора, що призводить до зміни характеристик резонатора.

Безконтактне вимірювання параметрів вібрації резонаторним методом можливе також у тому разі, якщо приймально-передавальну антену ввімкнено в ланцюг встановлення частоти НВЧ-генератора, тобто якщо він працює в режимі автоматичної генерації. Такі системи називаються автоматичними диногенераторами або просто автоматичними диногенераторами.

Недоліком є те, що клістроли потребують високої напруги живлення, що призводить до збільшення габаритів обладнання та підвищення споживаної потужності. Однак цього можна уникнути, якщо як НВЧ-генератори використовувати твердотільні НВЧ-діоди (ДГ, ЛПД, ІПД, ТД і тд).

Вибір методу вібродіагностики залежить від структурного, функціонального та вібраційного стану об'єкта.

Структурний стан характеризується властивостями конструкції, тобто геометрією елементів і зв'язками між ними. У цьому разі доцільно використовувати методи спектрального аналізу.

Джерела вібрації можна ідентифікувати за їхніми гармонійними порядками. Амплітуда цих гармонік характеризує розподіл енергії залежно від стану об'єкта. За наявності дефектів енергія вібрації зростає.

В обертових і зубчастих механізмах структурний стан характеризується ударними процесами. У цьому разі доцільний спеціальний метод накопичення, за

якого виділяються ударні імпульси від кожного зуба діагностованої передачі. За частотою імпульсів визначається джерело (шестерня), за різницею рівнів - причина (дефектний зуб), а за абсолютним значенням рівня імпульсів - ступінь дефекту.

Вібраційний стан визначається сукупністю вібраційних характеристик об'єкта і є наслідком його структурно-функціонального стану та динамічних характеристик. Навіть за нормального конструктивного та функціонального стану вібраційний стан може бути незадовільним через резонансні ефекти та паразитні коливання.

Перспективними є методи, що використовують динамічні зміни об'єкта, найпростішими з яких є зміни ознаки, швидкості та характеру процесу. Ці ознаки відображають еволюцію дефектів у часі, що дає змогу прогнозувати майбутні стани та визначати працездатність об'єкта.

Алгоритми аналізу кореляційних і спектральних властивостей вібросигналів включають дискретизацію вібросигналу, цифрову фільтрацію, розрахунок інформаційних параметрів і визначення технічного стану об'єкта. Програмні засоби моделювання об'єктів можуть імітувати сигнали як справних, так і несправних механізмів.

Одним із найефективніших інструментів дослідження вібраційних процесів є моделювання механічної структури об'єкта. Під час побудови моделі визначаються основні зв'язки між елементами об'єкта та властиві їм закономірності. Математичні моделі корисні для проведення досліджень. Якщо спектр віброакустичного сигналу модульований на одній або декількох частотах - явище, характерне для об'єктів, що містять зубчасті кінематичні пари, - то в цьому разі може бути ефективним стискання інформації шляхом логарифмування та перетворення Фур'є логарифмічного спектра потужності, що називається методом Кепстрема. Цей метод дає змогу витягти інформацію про сигнал із результатів нелінійних перетворень і багаторазових відображень під час модуляції. При цьому вся енергія віброакустичного сигналу, яка за спектрального методу розсіюється на безліч

гармонік, за кепстромівського методу аналізу сигналу локалізується в одну складову.

Капстральний метод використовується для формування діагностичних ознак тільки в тому разі, якщо вібраційний процес має періодично модульований спектр. Такий спектр спостерігається в разі явищ нелінійної взаємодії вузлів і деталей механізму, наявності амплітудної та частотної модуляції, перетворень типу згортки кількох часових процесів, а також у разі зміни фізичних параметрів механізму, зносу, зміни жорсткості та ударної взаємодії.

Стаціонарні комплекти лабораторного обладнання призначені для дослідження і випробування різних механічно навантажених об'єктів та їхніх елементів.

Переносні комплекти обладнання призначені для технічної діагностики та балансування обертових частин машин і механізмів, а також для послідовного або паралельного контролю рівнів вібрації та шуму в одній або декількох точках об'єму, включають у себе прилади контролю, сигналізації, балансування та вібродіагностики.

Комплекти обладнання для випробувань призначені для перевірки виробів на вібрацію, ударні навантаження й акустичний шум і включають прилади та засоби для завдання та відтворення механічних навантажень, апарату керування, контролю та вимірювання. Ці пристрої повинні забезпечувати достовірність випробувань і відповідати технічним характеристикам обладнання та вимогам умов його експлуатації.

Багатоканальні вібровимірювальні прилади, що широко застосовуються в системах вібродіагностики, класифікуються за основним принципом вимірювання:

- послідовне вимірювання параметрів вібрації в окремих точках об'єкта;
- паралельне вимірювання параметрів вібрації одночасно в усіх контрольованих точках об'єкта;

- комбіновані прилади, які паралельно реєструють параметри вібрації в усіх контрольованих точках і послідовно вимірюють цей параметр у кожній точці.

У разі використання пристроїв послідовного вимірювання параметрів вібрації датчик вібрації закріплюють на контрольній точці об'єкта, і через узгоджувальний передпідсилювач його під'єднують до електромеханічного чи електронного комутатора, який зі свого боку під'єднують до вимірювального пристрою.

Прилади, що вимірюють параметри вібрації паралельно, мають стільки каналних підсилювачів і вимірювачів, скільки датчиків встановлено на об'єкті. Такі прилади являють собою комплекти одноканальних вібровимірювальних пристроїв.

Комбіновані прилади більш перспективні, оскільки дають змогу контролювати параметри вібрації в кожній точці об'єкта, оперативно оцінювати її екстремальні значення і виконувати розкладку допустимих рівнів вібрації. Такі прилади широко використовуються для вібродіагностики об'єктів зі складними механічними структурами.

Основною тенденцією в розвитку контролерів для вібродіагностики є побудова багатоканальних систем з паралельною селекцією сигналів.

Комплексні селектори дають змогу контролювати режим випробувань за максимального, мінімального та середнього рівнів вібрації.

Під час вибору обладнання наперед необхідно встановити місця розташування контрольних точок, необхідну і достатню їхню кількість, кількість вимірюваних компонентів у кожній точці вимірювання, контрольовані параметри вібрації та діапазон частот, у якому виникнення характерних і небезпечних несправностей призводить до зміни амплітуди або загальногорівня вібрації окремих гармонійних складових спектра.

Статистичне опрацювання даних вібропробувань двигуна дає змогу будувати карти розпізнавання дефектів. Ці дані можуть бути використані для оцінки ознак дефектів і вибору частотного діапазону обладнання, необхідного для виявлення характерних дефектів двигуна. У будь-якому разі верхня межа частотного діапазону не має бути меншою за подвоєну робочу частоту обертання ротора.

Багатофункціональні системи використовуються для аналогового вимірювання та аналізу вібрації, цифрового оброблення результатів і виведення гістограм розподілу рівнів вібрації, фазових діаграм і частотно-часових залежностей рівнів і фаз вібрації.

Системи автоматизації можна розділити на три основні групи:

У першій групі комп'ютери використовуються для оперативного оброблення сигналів.

У другій групі комп'ютер обробляє сигнали і формує корельовані сигнали у відповідь на зміну режиму випробувань.

Третя група - повністю автоматизовані системи, у яких комп'ютер включено в ланцюжок оброблення, аналізу та управління всіма режимами роботи відповідно до програм дослідження. Прості автоматизовані системи дають змогу швидко виміряти й проаналізувати характерні коливання та порівняти їх з еталонними.

Оскільки реальні коливання мають випадковий характер, то для аналізу об'єкта діагностики необхідно вимірювати параметри широкого смугових випадкових коливань.

Особливістю приладів, що вимірюють параметри випадкових коливань, є наявність у них частотно-вибіркової схеми.

Утворення дефектів призводить до зміни рівня вібрації в смузі частот $\Delta\omega$. Для підвищення інформативності параметрів вібрації у вібровимірювальній апаратурі використовується фільтр, що пропускає тільки спектральні складові з частотами в межах $\Delta\omega_0$. У цьому разі сигнал на виході фільтра складається із суми гармонійного сигналу з амплітудою A_0 і шуму $P(t)$.

У вібродіагностичному обладнанні використовують різні типи фільтрів, зокрема активні аналогові фільтри, мультиплікативні селектори, цифрові та механічні фільтри.

Діагностована випадкова вібрація, що діагностується, повинна аналізуватися в реальному часі на двоканальному аналізаторі. Для швидкого перетворення Фур'є та оперативного оброблення інформації в кожному каналі аналізатора встановлено процесор; наявність двох каналів дає змогу оцінювати стан об'єкта за спектральними кореляційними функціями, а також за капстралом. Результати аналізу виводяться на дисплей.

2.3. Стаціонарні системи вібродіагностики

Розширений аналіз вібрації може бути використаний за допомогою обладнання вібромоніторингу. Основне призначення обладнання для вібромоніторингу - виявлення незворотних змін вібрації обладнання та прогнозування частоти їх виникнення. Додатковим завданням, що вирішується за допомогою обладнання моніторингу, є визначення причин виявлених змін. Це завдання вирішується фахівцями, які аналізують результати моніторингу, наприклад, за допомогою спеціального спеціалізованого програмного забезпечення.

Обладнання вібромоніторингу інтегрується в системи захисного або прогностичного моніторингу. Найчастіше використовуються системи захисного моніторингу, в яких аналізується інформація про конструкцію та робочі параметри контрольованого об'єкта. У таких системах за допомогою стандартного контролера зазвичай виконується тільки найпростіший аналіз вібрації. Крім визначення величини вібрації в стандартному діапазоні частот, у деяких випадках виконують спектральний аналіз вібрації в смузі частот до 1-2 кГц, однак вимоги до якості такого аналізу зазвичай значно нижчі, ніж до надійності технічних засобів.

Структура вихідних даних вібраційних каналів систем моніторингу захисту зазвичай визначається стандартами АСУ ТП.

Основою обладнання систем "предиктивноговібромоніторингу" часто є спектральний аналіз, що містить канали вібровимірювань та аналізу. До засобів спектрального аналізу таких систем висуваються високі вимоги. Верхня частотна межа спектрального аналізу зазвичай обмежується $\sim 1000-2000$ Гц, але часто перевищує ~ 20 кГц, що залежить від конструктивних особливостей і швидкості обертання контрольованого об'єкта. З урахуванням цього вибирається тип віброперетворювача. Вимога до динамічного діапазону, без урахування збільшення під час спектрального аналізу сигналу, перебуває на рівні ~ 106 і досягається застосуванням АЦП з бітовою глибиною не менш як 20, або використанням АЦП меншого розміру й підсилювача з регульованим коефіцієнтом посилення. Нарешті, лінійність вимірювально-аналітичного тракту не повинна перевищувати 0,1%. Зокрема, використання диференціальних вимірювальних перетворювачів, перетворювачів із вбудованими підсилювачами тощо накладає вимоги, не менш жорсткі, ніж до завадостійкості системи.

Стаціонарне виконання систем вібромоніторингу істотно змінює вимоги до віброаналізаторів. По-перше, відсутність жорстких вимог до габаритів і енергоспоживання аналізаторів робить можливим широке застосування віртуальних аналізаторів на базі персональних комп'ютерів. Оскільки комп'ютерний аналіз сигналів дає змогу швидко виконати практично будь-який вид аналізу, багато стаціонарних систем у міру необхідності аналізують вібрацію, зокрема під час роботи устаткування, як у сталому, так і в перехідному режимах.

Для розширення діагностичних можливостей моніторингу стаціонарні системи часто оснащуються додатковими портативними каналами вимірювання вібрації в будь-якому місці обладнання, де в період вимірювань можуть бути встановлені вимірювальні перетворювачі.

Отримання додаткових даних дає змогу фахівцеві (або діагностичному програмному забезпеченню) прогнозувати виникнення несправностей на деякий час, вирішуючи проблему виявлення більшості, а не деяких несправностей.

Як показує практика, стаціонарні системи моніторингу необхідні для багаторежимного відповідального обладнання, яке в основному обслуговується ремонтним персоналом. Для виявлення небезпечних помилок обслуговуючому персоналу немає необхідності контролювати вібрацію в численних точках контролю. Діагностична інформація у всіх точках контролю вібрації, включно з тими, які використовуються для аварійного захисту, може бути отримана послідовно протягом тривалих інтервалів вимірювань.

Структура віброзахисної системи моніторингу та діагностики наведена на рис. 2.1.

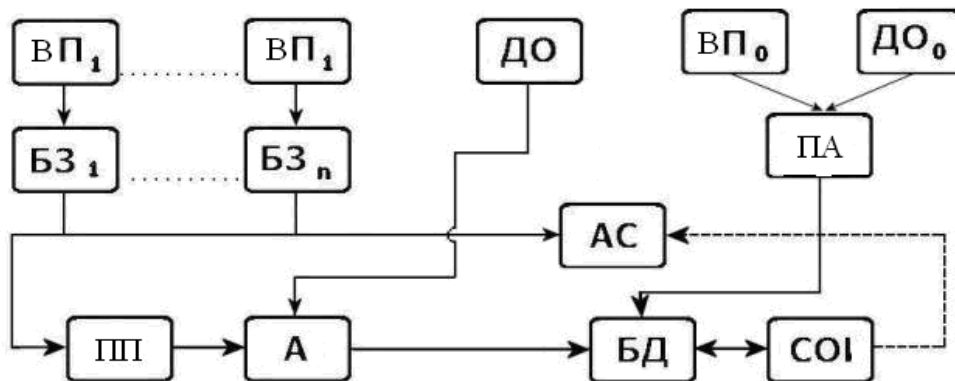


Рис. 2.1. Структура стаціонарної системи вібраційного захисту, моніторингу і діагностики обладнання:

ВП – вимірювальні перетворювачі; ДО – датчик оборотів; БЗ – блоки захисту;

АС – аварійна сигналізація; ВУС – пристрої погодження; А – аналізатор;

ПА – портативний аналізатор; БД – база даних; СОІ – засоби обробки інформації.

Віртуальні віброаналізатори, що входять до складу стаціонарних систем

вібромоніторингу та діагностики, повинні виконувати основні види аналізу сигналів, необхідні для інтелектуального моніторингу та поглибленої діагностики обладнання. Основними видами аналізу для моніторингу вібрації обладнання в типових режимах роботи є:

- вимірювання рівня вібрації в стандартних частотних діапазонах;
- широкосмуговий аналіз вібрації, наприклад, триоктавний;
- вузькосмуговий спектральний аналіз низькочастотних та середньочастотних коливань;
- статистичний аналіз результатів періодичних вимірювань;
- контроль геометрії швидкохідних валів у підшипниках ковзання;

Основні аналізи включають для діагностики двигунів, обертових і асинхронних машин включають:

- вузькосмуговий спектральний аналіз вібрацій у широкому діапазоні частот;
- вузькосмуговий спектральний аналіз огинаючої високочастотних випадкових коливань, розділених смуговим фільтром;
- статистичний груповий аналіз результатів вимірювань діагностичних параметрів.

До інших видів аналізу для контролю та діагностики належать:

- синхронний спектральний аналіз вібрації в перехідних режимах роботи;
- взаємний спектральний аналіз вібрацій (взаємний фазовий спектр);
- аналіз морфології вібрації корпусу з визначенням амплітуди і фази вібрації в контрольних точках на частоті обертання машини (для балансування ротора);
- аналіз керуючих параметрів системи контролю та діагностики сталого режиму роботи з метою визначення її продуктивності та коректності отриманих результатів.

Віртуальний аналізатор вібраційних сигналів зазвичай складається з комп'ютера і двох послідовних пристроїв на вході. Перший пристрій підтримує вимірювальний перетворювач і містить його джерело живлення, керований комп'ютером підсилювач

і фільтр; другий пристрій перетворює аналоговий сигнал у цифрову послідовність і передає його в пам'ять комп'ютера. Крім перетворювачів вібрації часто використовують датчики обертання (кутового положення вала). Обидва типи пристроїв випускаються низкою спеціалізованих фірм.

Ці пристрої можуть бути зовнішніми, в цьому випадку передача даних здійснюється через стандартний комунікаційний інтерфейс, наприклад USB-порт. Через обмежену швидкість передавання інформації часто використовуються пристрої, які вбудовуються в комп'ютер, живляться від загального джерела живлення і передають інформацію безпосередньо на шину комп'ютера.

2.4. Математична модель вібросигналів

Двигуни з елементами, що перебувають в обертальному русі, генерують складні форми механічних коливань. Ці вібрації зумовлені фізичною взаємодією елементів, пов'язаних із дисбалансом, люфтом, вигином вала, неспіввісністю та дефектами деталей двигуна. Ці складні вібрації несуть у собі велику кількість інформації про динамічні явища, що відбуваються в робочій машині, і можуть бути зареєстровані у вигляді коливань корпусних деталей машини. Серед усієї інформації, що міститься в цих коливаннях, слід звернути увагу на дефекти в елементах машини та інформацію, що дає змогу ідентифікувати їхнє виникнення.

Надалі під час аналізу отриманих вібраційних сигналів вони подаються в частотній і часовій областях. Аналіз у часовій ділянці дає змогу визначити зміну сигналу в часі, проаналізувати зміну амплітуди та зростаючий вплив вищих гармонік сигналу. Аналіз у частотній області дає змогу проводити спектральний аналіз і визначати вплив окремих частотних складових на результуючий сигнал. На перших етапах розвитку дефекту в спектрі з'являється пік на характерній частоті дефекту конкретного елемента підшипника, а також перша механічна гармоніка оборотної частоти обертання ротора.

У міру подальшого розвитку дефекту з'являються гармоніки від характерних частот підшипників. Як правило, друга і третя гармоніки виникають від основної частоти дефекту підшипника. Поряд із кожною з цих гармонік з'являються також ліва і права бічні частоти, причому кількість пар може бути дуже великою. Що серйозніший дефект, то більше бічних гармонік присутнє в гармоніках частоти дефекту. Знос підшипників з таким спектром уже очевидний і може поширюватися практично на всю робочу поверхню підшипника, вже групуючись і зачіпаючи кілька елементів підшипника. Підшипники необхідно замінити або провести інтенсивну підготовку до цього.

Це остання стадія дефектів підшипників. Знос підшипника досягає такої стадії, коли характерна частота дефекту стає нестабільною через зношення, і та сама доля спіткає побічні гармоніки. Суперпозиція багатьох гармонік, що складаються з основної та побічних, являє собою досить складний аспект. Якщо частоти основних обертонів цих сімейств відрізняються незначною мірою, то сума всіх частот є загальним спектром, що охоплює діапазон частот, який охоплює всі гармоніки від усіх наявних дефектів підшипників кочення.

Для представлення сигналу в частотній області та в часовій області використовується перетворення Фур'є. Це математична схема, яка пов'язує часовий або просторовий сигнал (або деяку модель цього сигналу) з його поданням у частотній області.

Перетворення Фур'є для безперервного сигналу $h(t)$ є перетворенням Лапласа відносно функції f і визначається за формулою:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-j2\pi ft) dt = F\{h(t)\} \quad (2.6)$$

У цьому рівнянні $H(f)$ називається безперервним перетворенням Фур'є з безперервним часом (або безперервним перетворенням Фур'є, БТПФ). Змінна f в комплексній синусоїді $\exp(-j2\pi ft)$ відповідає частоті, вимірюваній у герцах, коли

змінна t вимірюється в одиницях часу (у секундах). По суті, БТПФ визначає частоту й амплітуду комплексної синусоїди, на яку розкладається дане довільне коливання. Зворотне перетворення Фур'є визначається як:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) \exp(j2\pi ft) df = F^{-1}\{H(f)\}, \quad (2.7)$$

Значення інформаційних параметрів вібро сигналу можна оцінити на основі подання складних коливань у вигляді суми простіших складових. Вібраційні сигнали можуть бути представлені трьома складовими: флуктуаційною, імпульсною та випадковою у вигляді шуму.

Коливальна складова характеризується безперервністю та відносною плавністю змін. Вони зумовлені динамічними процесами, час генерації яких пропорційний часу циклу роботи механізму, і виникають на низьких частотах, близьких до власної частоти обертання. Вони спричиняються дисбалансом, неспіввісністю, ослабленням механічних зв'язків конструкції, вигином валів, хвилеподібним рухом тіл кочення і нерівномірним абразивним зносом. Кожна з цих причин формує складні квазівипадкові коливання, хоча зазвичай вони генерують періодичні складові. Коливальні складові можуть бути виражені таким чином:

$$\Theta(t) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n A_{ij} \sin(\omega_{ij} t + \gamma_{ij}). \quad (2.8)$$

де A_{ij} - амплітуда віброприскорення j -й гармоніки i -й компоненти флуктуаційної складової;

$\Theta(t)$ - функція, що описує зміну флуктуаційної складової віброприскорення в часі, представлена у вигляді ряду Фур'є;

ω_{ij} - частоти відповідних гармонік;

γ_{ij} - фазове зрушення відповідних гармонік.

У частотній області, шляхом використання БТПФ, одержимо:

$$\Theta(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n A_{ij} \sin(\omega_{ij} t + \gamma_{ij}) \exp(-j2\pi ft) dt, \quad (2.9)$$

Шумові складові в сигналі виявляються в результаті впливу випадкових факторів під час роботи машини або механізму. Як приклад можна навести потрапляння дрібних частинок у мастило підшипника або зовнішній вплив (зміна навантаження) на досліджуваний вузол.

Під час практичного опису цієї складової найчастіше використовують нормальний або експоненціальний розподіл густини ймовірності.

Для нормального розподілу інтегральна функція і функція густини ймовірності мають такий вигляд:

$$F(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \arcsin \left(\frac{x - m_x}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right]; \quad W(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x - m_x}{2\sigma_x^2} \right)^2}, \quad (2.10)$$

де $m_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X_k(t) dt$ - математичне очікування реалізації випадкової величини $X(t)$;

$$\sigma_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [X_k(t) - m_x]^2 dt \quad - \text{дисперсія } X(t);$$

Для експоненціального розподілу щільність вірогідності для випадкової величини $X(t)$ має наступний вигляд (де λ - умовна щільність вірогідності):

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x > 0 \\ \lambda e^{-\lambda x} & \text{при } x \geq 0 \end{cases}, \quad (2.11)$$

Математичне очікування:

$$m_x = \frac{1}{\lambda}$$

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_x = \frac{1}{\lambda}$$

Графік флукутаційної і випадкової складової сигналу представлений на рис. 2.2:



Рис. 2.2. Флукутаційна і випадкова складові сигналу

Компоненти, що коливаються, несуть корисну інформацію про об'єкт. Випадкові компоненти часто викликають перешкоди (виняток становить відсутність мастила). Тому часто виникає завдання відокремити флукутаційні компоненти від шуму.

Імпульсна складова вібросигналу характеризується високою швидкістю наростання та малою тривалістю імпульсу (рис. 2.3). Імпульсні складові зумовлені ударно-динамічними явищами, пов'язаними з локальними дефектами на робочих поверхнях елементів машин (наприклад, доріжок кочення і тіл кочення підшипників, контактних поверхонь зубів шестерень).



Рис. 2.3. Вид сигналу з ударними імпульсами

Спектр коротких імпульсів дуже широкий. Це означає, що енергія сигналу не зосереджена на кількох частотах, а розподілена по всьому частотному діапазону. Це характерно для недетермінованих сигналів, таких як випадковий шум і перехідні процеси.

Враховуючи, що спектр дельта-функції (яка являє собою імпульс нескінченно малої тривалості) дорівнює нескінченності, можна математично представити імпульсний сигнал у вигляді дельта-функції. На практиці імпульсна складова найчастіше описується за допомогою дельта-функції.

Одиничну імпульсну функцію (дельта-функцію) можна розглядати як вхідний сигнал з нульовою шириною і нескінченною висотою:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0, \end{cases} \quad (2.12)$$

Якщо імпульси повторюються з постійною частотою, то результуючий спектр уже не є безперервним, а складається з гармонік частоти повторення імпульсів, обвідна яких збігається з формою спектра одиночного імпульсу. Такі сигнали виникають, наприклад, у підшипниках із дефектами (яма, подряпини тощо) на одному кільці. Ці імпульси дуже вузькі й завжди викликають великий ряд гармонік.

Таким чином, усі складові вібросигналу можуть бути описані математичними формулами, а сам вібросигнал може бути проаналізований різними способами.

Випадкові сигнали можуть набувати будь-яких значень у певному діапазоні і тому характеризуються не амплітудою, частотою або фазою, а піковими, середньоквадратичними, середніми і піковими значеннями. Періодичні коливання можуть бути виражені у вигляді спектра. Періодичні коливання можуть бути виражені у вигляді спектра, мал. 2.4 (а) або мал. 2.4 (б), або множини кратних їм значень.2.5.

Якщо сигнал являє собою комбінацію двох найпростіших гармонійних складових різних частот і амплітуд, як на рис. 2.5, то його спектр має вигляд, показаний на рис. 2.4 (в), праворуч, де добре видно наявність двох гармонійних складових різних частот і амплітуд.

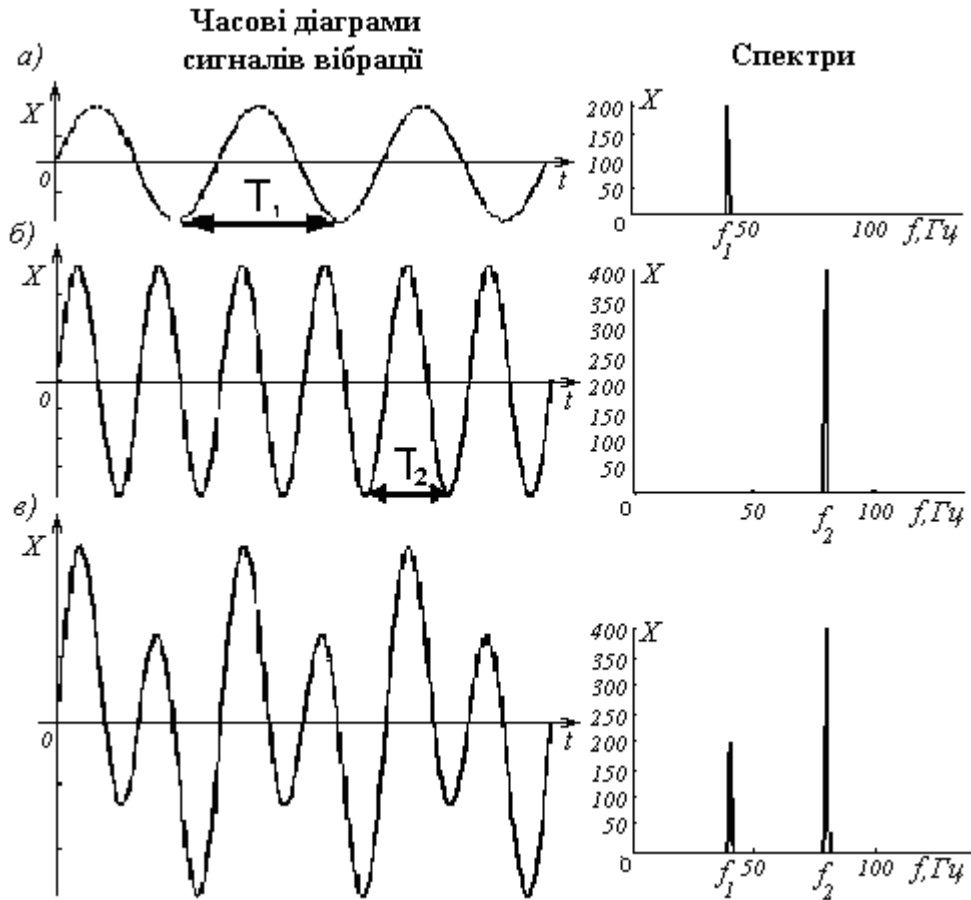
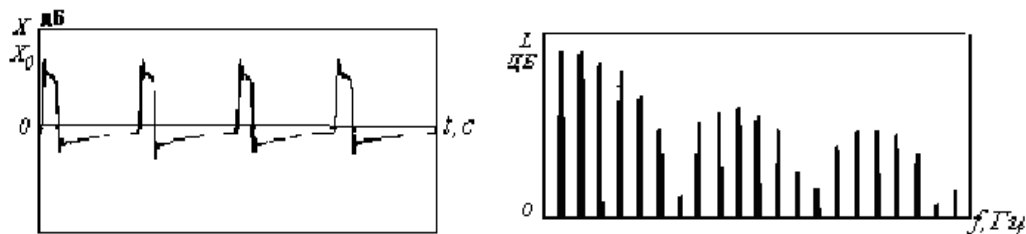


Рис.2.4. Часові сигнали вібрації і їх спектри



а) часова розгортка сигналу вібрації

б) спектр

Рис. 2.5. Складний періодичний сигнал вібрації і його спектр

Періодичну складову представлено спектром, тому випадкову складову має бути представлено так само, але спектр є безперервним (рис. 2.6).

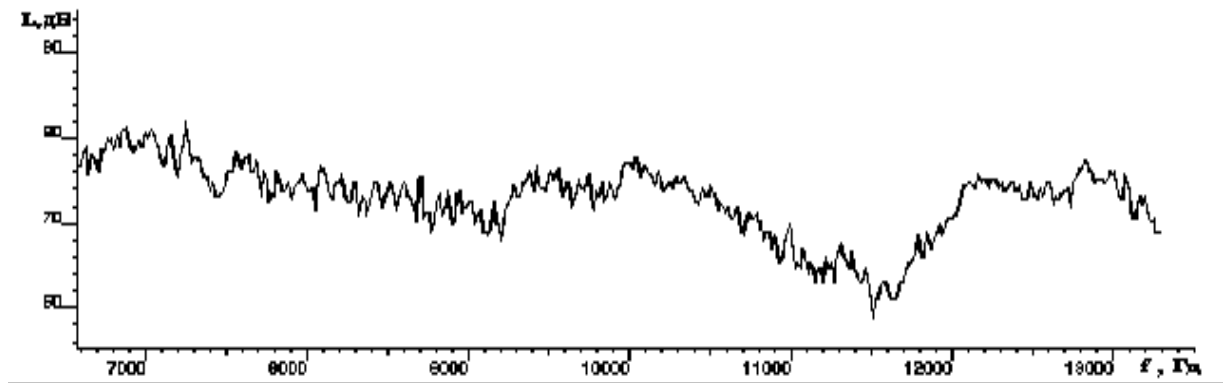


Рис.2.6. Спектр випадкових складових вібрації

Спектри корисні тим, що дають змогу розділити коливання на складові з різними властивостями.

Типовий спектр (рис. 2.7), як правило, характеризується великою кількістю гармонійних складових у низькочастотному діапазоні. Зі зростанням частоти кількість гармонійних складових зменшується і у високочастотній області практично відсутня.

Під час діагностики машин і обладнання необхідно враховувати характеристики вібрації на різних частотах під час вибору діапазону частот вібрації. Наприклад, у ділянці дуже низьких частот вібрації можуть збуджуватися не самою контрольованою машиною, а іншими машинами, що працюють поруч, наприклад, або, особливо, транспортними засобами, що проїжджають на відносно великі відстані.



Рис. 2.7. Спектр сигналу вібрації

Низькочастотні вібрації характеризуються слабким загасанням у просторі. Це означає, що в точку встановлення датчика потрапляють вібрації від усіх вузлів контрольованої машини, інших машин, підключених до неї, і сусіднього обладнання. Тому під час аналізу низькочастотних вібрацій виникає проблема виявлення несправних вузлів і завадостійкості. На цих частотах (у діапазоні частот від трьох до п'яти гармонік швидкості обертання) машина вібує як єдине ціле, і для того, щоб струсити всю машину, потрібна велика сила та велика несправність.

На середніх частотах у будь-якій контрольній точці вібрація збуджується переважно завдяки коливальним силам, що діють на найближчі до неї деталі машини. Спектр вібрації містить велику кількість гармонійних складових різних частот, але через велику кількість резонансів відношення амплітуд цих складових сильно відрізняється від відношення величин коливальних сил, що їх збуджують. У результаті інформація про дефекти, що знаходяться в джерелі цих коливальних сил,

спотворюється, а відтворюваність результатів порушується за незначної зміни швидкості обертання машини.

За більш високих частот коливання стають хвилеподібними, у спектрі з'являється мало ліній і (мабуть) менше інформації, але навіть невеликих сил достатньо для збудження коливань.

Колівання на ультразвукових частотах збуджуються здебільшого мікроударами, але поширюються тільки через однорідне середовище (метал із болтами або без зварних швів).

РОЗДІЛ 3. СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВІБРОДІАГНОСТИКИ

3.1. Контрольно-вимірювальні системи вібродіагностики

Ступінь безпеки системи (об'єкта), надійність її функціонування і прогнозування її відмови можуть бути здійснені за допомогою технічної діагностики. Технічна діагностика розв'язує широке коло завдань, пов'язаних зі збором і оцінкою діагностичної інформації про стан окремих елементів авіаційних двигунів і всієї техногенної системи, а також із прогнозуванням часу настання відмови в їхній роботі.

Виходячи з визначення технічної діагностики, можна виокремити два взаємопов'язаних напрямки розвитку, які формують структуру практичних застосувань у вигляді контрольно-вимірювальних систем. Перший напрямок розвитку забезпечує розв'язання поставлених завдань і гарантує отримання в потрібний час достатньої кількості інформації про ступінь надійності в робочих процесах вузлів, блоків, агрегатів і системи загалом.

Другий напрям розвитку структури контрольно-вимірювальної системи діагностування полягає в забезпеченні достовірної інформації про стан об'єкта управління (системи), його компонентів, блоків, вузлів і об'єкта управління в цілому.

Теорія керованості містить у собі такі елементи:

- методики визначення обсягу інформації, необхідної та достатньої для діагностування механічних систем;
- розроблення методів і засобів отримання діагностичної інформації;
- розробка і впровадження контрольно-вимірювальних приладів і систем для діагностування стану досліджуваної системи машини;
- методи визначення відмов системи.

Теорія розпізнавання включає такі етапи:

- розроблення діагностичних моделей (методів обробки інформації, одержуваної від контрольно-вимірювальної системи);
- створення правил розв'язання моделі стану технічної системи в кожний момент часу на основі характеристик, які відстежуються діагностичною контрольно-вимірювальною системою; і
- розробка алгоритмів прогнозування і розпізнавання стану системи машини в конкретний момент часу.

Суть технічного діагностування представлена у вигляді блок-схеми (рис. 3.1). Розглянемо сутність кожного елемента обох теорій і шляхи розв'язання задачі технічного діагностування, що визначає надійність машинної системи і прогнозує відмови.



Рис. 3.1. Структура технічної діагностики

Завдання теорії розпізнавання образів розв'язують із використанням математичних моделей, які розробляють на етапі формування структури контрольно-

вимірювальної системи технічного діагностування. При цьому паралельно проводять серію експериментів і розрахунків математичної моделі на досліджуваній технічній системі або її фізичній моделі з метою визначення граничних значень показників надійності. Тим самим забезпечується розв'язання завдань етапу розроблення правил розв'язання стану технічної системи за конкретними значеннями параметрів.

Наступним етапом розроблення системи технічного діагностування є розроблення алгоритмів прогнозування та розпізнавання стану технічної системи. Як правило, алгоритми мають розроблятися з урахуванням того, щоб програмний засіб працював у реальному часі.

Особливу увагу під час розроблення комп'ютерних програм слід приділити розв'язанню задачі прогнозування стану системи за поточними значеннями параметрів.

Приклад побудови контрольно-вимірювальної системи для технічного діагностування наведено на рис. 3.2.

Процес контролю здійснюється таким чином. На основі інформації, отриманої на етапі моделювання, як було описано вище, визначається перелік параметрів, що підлягають контролю в системі, яка цікавить. На основі аналізу фізичних властивостей цих параметрів вибирається метод неруйнівного контролю, здатний забезпечити необхідну інформацію про точність і надійність. Потім вибирають наявні або проєктують необхідні контрольно-вимірювальні пристрої, що використовують такі методи неруйнівного контролю. Вхідними пристроями таких приладів є датчики (сенсори). Інформація з датчиків надходить у блок відповідних вимірювальних перетворювачів (ВП), які, взаємодіючи з входом комп'ютера, видають сигнали необхідних електричних параметрів.

Порядок і періодичність подачі на входи комп'ютера даних про значення конкретних параметрів системи (інформації з конкретних датчиків) задається спеціальною програмою. Для кожного контролюваного параметра техногенної системи апіорі або шляхом моделювання (математичного або фізичного)

встановлюються межі заданого рівня надійності (R_g) техногенної системи. Для забезпечення можливості безперервного аналізу роботи системи, прогнозування станів і документування даних проміжні значення параметрів системи моніторингу фіксуються принтером.

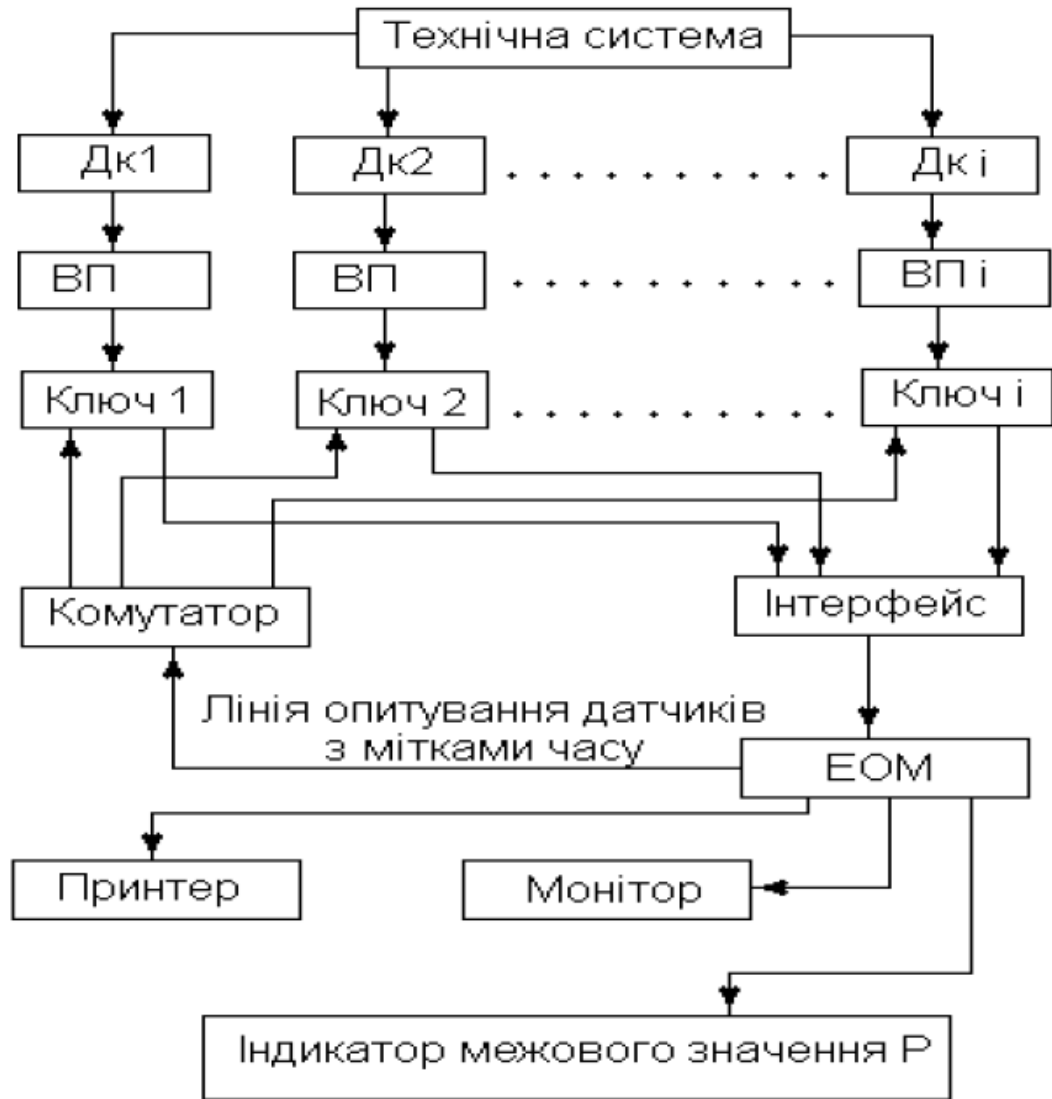


Рис. 3.2. Функціональна схема контрольно-вимірювальної системи технічної діагностики

Метою віброакустичної діагностики є оцінка ступеня відхилення технічних характеристик механічної системи або окремих її елементів від нормативних значень за непрямыми ознаками, тобто за зміною параметрів віброакустичних процесів

усередині механізму, що залежать від характеру механічної взаємодії вузлів і деталей.

3.2. Вимірювальна і аналізуюча апаратура вібродіагностики авіадвигунів

Найважливішим елементом інформаційної технології, що ґрунтується на будь-якому з методів обробки сигналів, є відповідні засоби вимірювання, аналізу та передачі інформації. У технологічному розвитку діагностичних інформаційних технологій можна виділити три основні етапи.

Перший етап - це початковий етап діагностики, зокрема віброакустичної діагностики, коли для оцінювання технічного стану двигуна за його шумом і вібрацією використовувалися органи чуття людини. Орган слуху здатний сприймати й аналізувати акустичні сигнали в звуковому діапазоні частот. Вібрації механізмів у цьому діапазоні частот завжди є джерелом звуку, а на низьких частотах людина сприймає їх контактено. Вибірковість аналізу вібрацій можуть забезпечити стетоскопи (слухові апарати), що існують уже сотні років. Ці можливості людини завжди визначали переважний розвиток діагностики за вібраційними і шумовими сигналами аж до останніх десятиліть.

Наступний етап визначається народженням віброакустичних приладів для вимірювання вібрацій і шумів, вищих за звуковий діапазон частот, і спектрального аналізу віброакустичних сигналів. Інтенсивні дослідження з пошуку методів аналізу сигналів, призначених для розв'язання діагностичних задач, почалися з появою цих приладів у 40-50-х роках нашого століття; якісне поліпшення діагностики двигунів відбулося в 60-70-х роках із розвитком методів ударного імпульсу й обвідної, а також розвитком методів діагностики, заснованих на вузькосмуговому спектральному аналізі сигналів, а також можливістю розв'язання багатьох діагностичних задач, пов'язаних із поодинокими вимірами вібрації та шуму. Того ж року було проведено низку досліджень з вивчення впливу різних

видів несправностей на характеристики двигуна і діагностичні сигнали. Результати цих досліджень показали, що найбільшою діагностичною інформацією володіють вібраційні сигнали, а багато інших видів сигналів значною мірою дублюють частину інформації, що міститься у вібраційних сигналах. Крім того, було встановлено, що дефекти в багатьох типах компонентів починають проявлятися задовго до виникнення аварійної ситуації і в першій половині життєвого циклу. Потім дефекти практично одразу починають впливати на вібрацію і шум, створювані цими компонентами. Основна проблема під час виявлення змін, викликаних дефектами, у вібраційних сигналах полягає в тому, щоб відрізнити їх від змін, спричинених варіаціями навантаження, швидкості обертання, температури компонентів, інших параметрів двигуна і зовнішніх умов. Ця проблема стає однією з найважливіших під час розв'язання задач діагностики двигунів і обладнання.

Третій етап у створенні засобів технічного діагностування став результатом бурхливого розвитку комп'ютерної техніки і технологій. У цей час з'явилися цифрові аналізатори спектра, які зробили можливою паралельну фільтрацію сотень частотних складових сигналу. І замість фахівців, які діагностують різні типи двигунів, з'явилися спеціалізовані програми, а згодом і програми для автоматичного діагностування та прогнозування технічного стану двигуна та його окремих вузлів. Поява потужних персональних комп'ютерів також послужила поштовхом до розвитку нових інформаційних технологій, заснованих на статистичних методах розпізнавання образів.

Усі засоби вимірювання та аналізу вібраційних і шумових сигналів ґрунтуються на трьох типах пристроїв, що виконують різні операції: по-перше, датчики вібрації або мікрофони, що перетворюють вібрації на електричні сигнали; по-друге, фільтри, які розділяють компоненти сигналу в потрібному діапазоні частот; по-третє, амплітуда виділених компонентів (потужність) виділеної компоненти оцінюється детектором. Фільтри не обов'язково підключаються до виходу детектора, а виконуються у вигляді електронних пристроїв. Вони можуть бути

акустичними, наприклад, резонатори, або механічними, наприклад, пружні прокладки, і розташовуються перед детектором. Залежно від того, яка інформаційна технологія використовується, різні прилади містять різні комбінації цих трьох типів. Нижче наведено основні типи конструкцій приладів, що використовуються для контролю та діагностики двигунів і обладнання на предмет вібрації та шуму.

Найпростішими є вимірювачі рівня загальної вібрації (шуму) і прилади, що вимірюють пік-фактор вібраційного сигналу, тобто реєстратори ударних імпульсів. Конструкцію цих приладів показано на рис. 3.3, а) і б) відповідно. Вимірювачі загального рівня не потребують фільтра, якщо немає особливих вимог до смуги частот вимірювального сигналу. Для простоти реалізації в п'єзоелектричних рівнемірах зазвичай використовують механічний резонатор у вигляді металевого стрижня, що резонує на частотах, вищих за 25 кГц. Такі високі резонансні частоти дають змогу, з одного боку, зменшити розміри резонатора, а з іншого - отримати вищі значення пфактора завдяки тому, що на високих частотах коливання стійкі в часі, є інтерференційними та збуренням, що спричиняються силами тертя елементів керування двигуна.

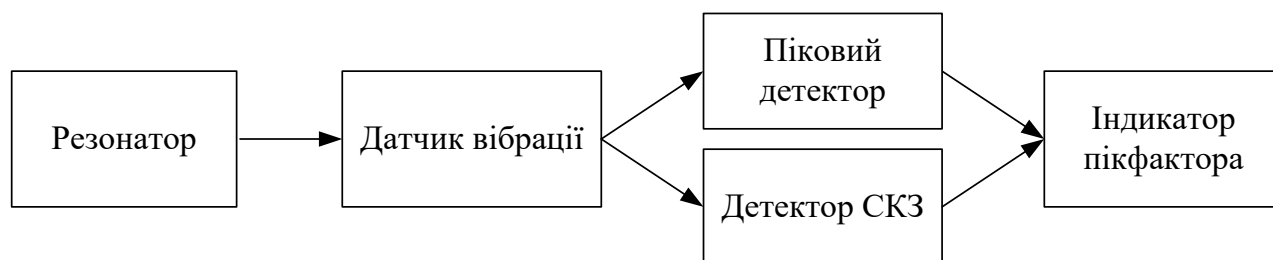
Найпростіші прилади були доступні на будь-якому етапі розвитку вимірювальної техніки, тому довгий час практична діагностика концентрувалася на них. Сьогодні бурхливий розвиток обчислювальної техніки та зниження її ціни дали змогу повною мірою використовувати на практиці всі навіть найскладніші інформаційні технології. Цифрові аналізатори сигналів сьогодні можна порівняти за вартістю з найпростішим аналоговим обладнанням і витісняють аналогове обладнання під час вирішення діагностичних завдань.

Серед найбільш часто використовуваних вимірювальних приладів, заснованих на комп'ютерних технологіях, можна виділити аналізатори форми сигналу, аналізатори спектра й обвідної спектра. 3.3 Функція аналізатора форми сигналу (рис. 3.3, в) полягає у вимірі амплітуди й фази окремих складових сигналу та

порівнянні окремих ділянок сигналу. Такі аналізатори широко використовуються для діагностики процесу балансування поршневих двигунів і роторів. Спектральні аналізатори (рис. 3.3, г) широко використовуються для контролю всіх типів двигунів і обладнання. Огинаючі спектральних аналізаторів (рис. 3.3, д) призначені для дослідження випадкових процесів, у яких потужність змінюється періодично.

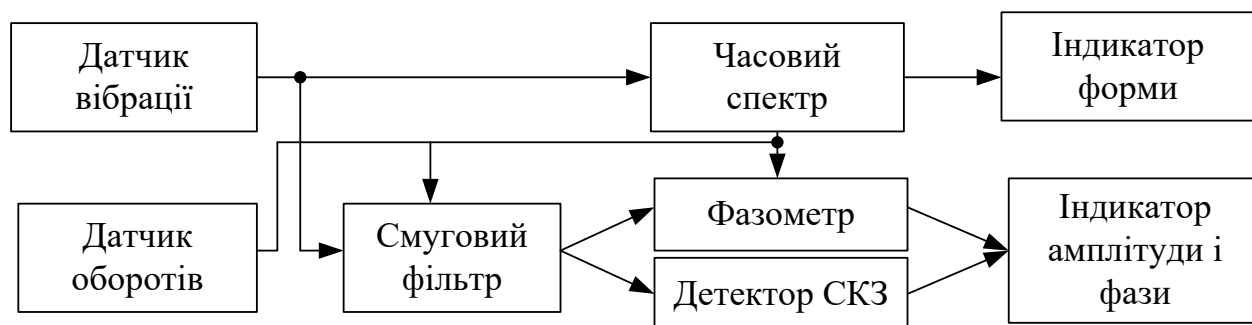


а) вимірник загального рівня вібрації (шуму)

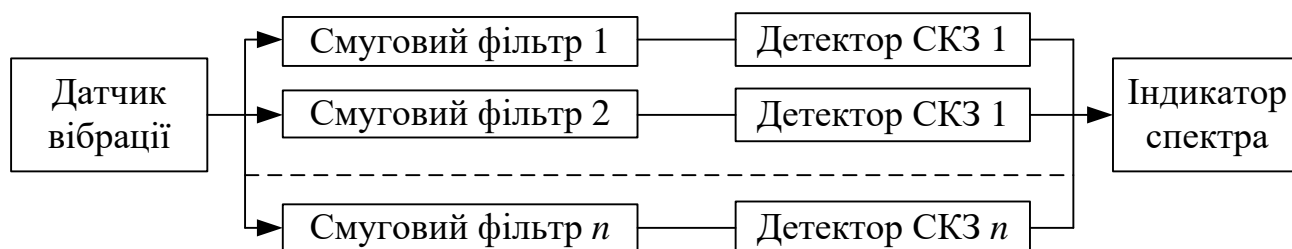


б)

вимірник пікфактора сигналу вібрації

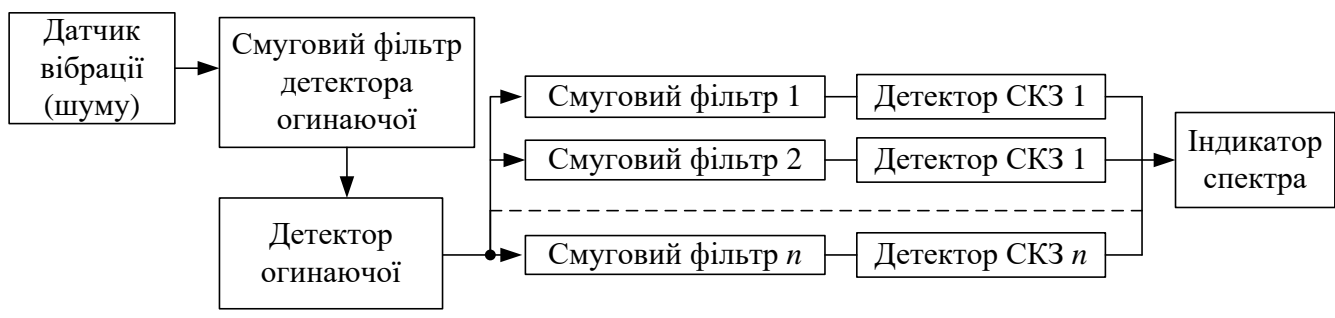


в) аналізатор форми сигналів вібрації



г)

аналізатор спектра сигналів вібрації



аналізатор спектра огинаючої сигналів вібрації

Рис. 3.3. Структура основних видів приладів для вимірювання і аналізу сигналів вібрації і шуму

де СКЗ - середньоквадратичне значення

Нині найдоступнішим засобом вимірювання та аналізу сигналів є персональний комп'ютер, оснащений пристроєм, що перетворює вібраційні та шумові сигнали в цифрову форму і вводить їх в оперативну пам'ять комп'ютера.

У такому вимірювальному пристрої може бути використана будь-яка з розглянутих інформаційних технологій або їх комбінація. Для всіх перерахованих вище пристроїв з невеликими змінами може бути використана професійна звукова плата. Їх конструкцію показано на рис. 3.4.3.4.



Рис. 3.4. Структурна схема вхідного пристрою

Такі засоби вимірювання та аналізу сигналів не вирізняються малими розмірами і можуть використовуватися в лабораторії або на стенді. Для вимірювання вібрацій у польових умовах можуть використовуватися засоби вимірювання та аналізу, побудовані за тими ж правилами, але на базі портативних комп'ютерів - портативних, ноутбуків і блокнотів. Перші з них мають ту саму плату, що й звичайний комп'ютер, другий і третій типи комп'ютерів мають додаткові входи за стандартом PC Card. Цей самий стандарт використовується і під час виробництва звукових карт і карт із пристроями введення аналогових сигналів. У цьому разі для проведення вимірювань і аналізу достатньо мати таку карту і пристрій введення, що включає датчик вібрації (шуму), джерело живлення і пристрій узгодження датчика з платою введення. Такі пристрої також випускаються багатьма зарубіжними компаніями.

Портативні пристрої на базі персональних комп'ютерів, як-от ноутбуки і блокноти, не знаходять широкого застосування в польових умовах, оскільки для їхньої роботи зазвичай потрібен комп'ютер промислового класу, який можна порівняти за ціною зі спеціалізованим цифровим аналізатором сигналів. Такі аналізатори випускаються багатьма компаніями і найбільш широко використовуються для практичної діагностики.

Цифрові аналізатори входять до певної групи технологій, подібних за способом обробки сигналів, і лише деякі з них призначені для використання всіх відомих технологій. Як правило, всі типи аналізаторів виконують вузькосмуговий спектральний аналіз сигналів і, дуже рідко, спектральний аналіз обвідної смугового сигналу, що необхідно для використання інформаційної технології обвідного методу. Причина цього полягає в тому, що через обмежений обсяг пам'яті в аналізаторі цей вид аналізу вимагає використання не одного, як у персональному комп'ютері, а двох паралельних процесорів. Один із них - сигнальний процесор, який використовується для попередньої обробки високочастотних сигналів у режимі реального часу.

Аналіз основних тенденцій розвитку обчислювальної техніки дає змогу припустити, що найближчими роками малогабаритні пристрої будуть широко використовуватися для найрізноманітніших цілей. Зрозуміло, в цьому напрямку розвиватиметься й обладнання для вимірювання та аналізу віброакустичних сигналів. Це призведе до подальшого зниження цін.

Підвищення продуктивності мікроЕОМ стимулюватиме ще один напрям розвитку у створенні технічних засобів для діагностики двигунів і обладнання. Йдеться про об'єднання функцій функціональної та тестової діагностики в одному пристрої.

Для цього необхідно забезпечити функції багатоканального аналізу сигналів, включно з кореляційним, крос-спектральним та іншими, а також увести в програмне забезпечення приладу функції генерації тестових сигналів і керування зовнішніми джерелами цих сигналів.

Технічні засоби вимірювання та аналізу сигналів у стаціонарних системах моніторингу та діагностики двигунів функціонально не відрізняються від тих, що використовуються в портативних системах, які розглядаються. Єдина відмінність полягає в технічній реалізації, пов'язаній із необхідністю повторення вимірювань в одних і тих самих контрольних точках через настільки малі проміжки часу, щоб забезпечити своєчасне вимкнення двигуна в разі виникнення несправності, наприклад лавини. Типова структура стаціонарної системи наведена на рис. 3.5.

Кількість блоків вимірювання та аналізу сигналів у стаціонарній системі зазвичай визначається кількістю контрольних точок і максимально допустимими інтервалами між вимірюваннями. Кількість датчиків в одному блоці може становити від одного до кількох десятків. У функції вимірювальних блоків входить аналіз вібрації, шуму та інших фізичних величин за програмою, що задається діагностичним центром.

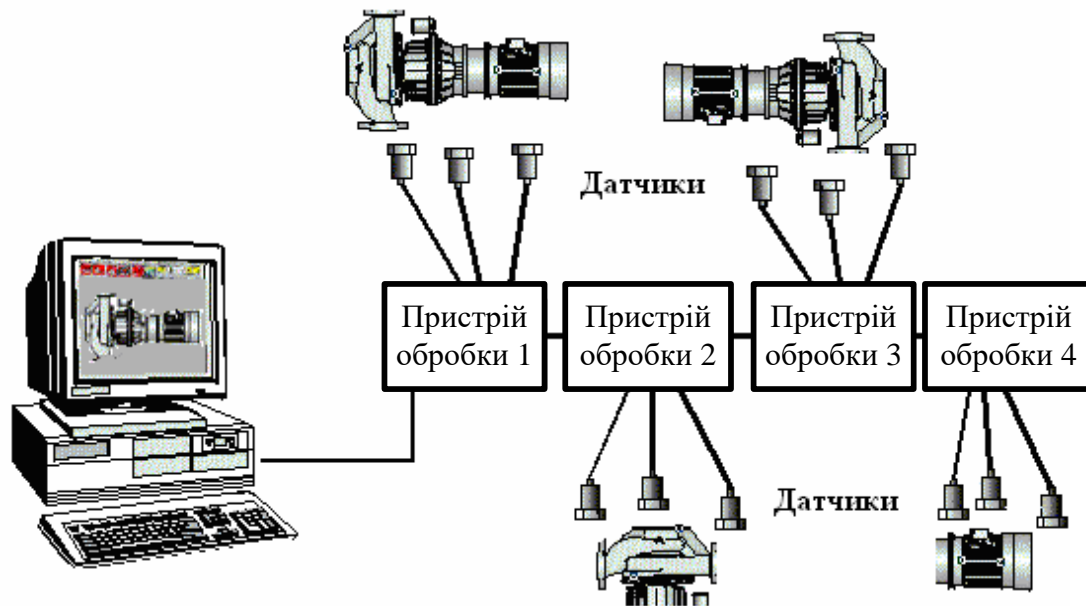


Рис. 3.5. Структура стаціонарної системи моніторингу і діагностики

Алгоритм програми автоматично змінюється залежно від результатів діагностики, тобто стану контрольованого об'єкта. У функції вимірювального блоку входить також порівняння результатів вимірювань і аналізу з пороговими значеннями, що задають межі допустимих змін діагностичних параметрів. Якщо допустимий час між періодичними вимірами досить великий, то в системі може бути використаний єдиний блок із датчиками, підключеними через електронний пристрій комутації сигналів. У цьому разі вимірювальний блок може бути конструктивно об'єднаний із діагностичним центром у єдиному корпусі. Діагностичний центр може бути або одним комп'ютером, під'єднаним до тієї самої мережі, що й вимірювальний блок, або групою комп'ютерів, що працюють паралельно або функціонально розділених.

Розвиток стаціонарних систем моніторингу також пов'язаний із розвитком функцій мікрокомп'ютерів. Цей розвиток може призвести до поділу функцій вимірювального блоку і діагностичного центру. Вимірювальний блок може перебрати на себе функцію моніторингу і звертатися до діагностичного центру тільки для виявлення несправностей за їхньої появи. У цьому разі очевидно, що

одна діагностична система може працювати з кількома вимірювальними блоками і контролювати стан обладнання.

Оскільки структура розглянутої системи засобів і управління безпосередньо пов'язана з операціями обробки даних комп'ютером, то зрозуміло, що загалом її розвиток слідуватиме тенденціям розвитку обчислювальної техніки. Тому як прогноз можна зробити висновок, що найближчими роками найбільшого поширення набудуть компактні пристрої для вимірювання та аналізу віброакустичних сигналів, оснащені різними технологіями оброблення сигналів, вбудованим мікрокомп'ютером з необхідною обчислювальною потужністю і стандартною операційною системою.

Для реалізації цього, крім багатоканального приймання, аналізу та математичного оброблення інформаційних сигналів, необхідно розв'язати проблему генерації зовнішніх тестових сигналів із заданими параметрами та програмного керування джерелами їх генерації (рис. 3.6).

Ємність і перелік параметрів цієї бази даних визначається на етапі постановки задачі залежно від схемних і технічних параметрів конкретної контрольно-вимірювальної системи або пристрою.

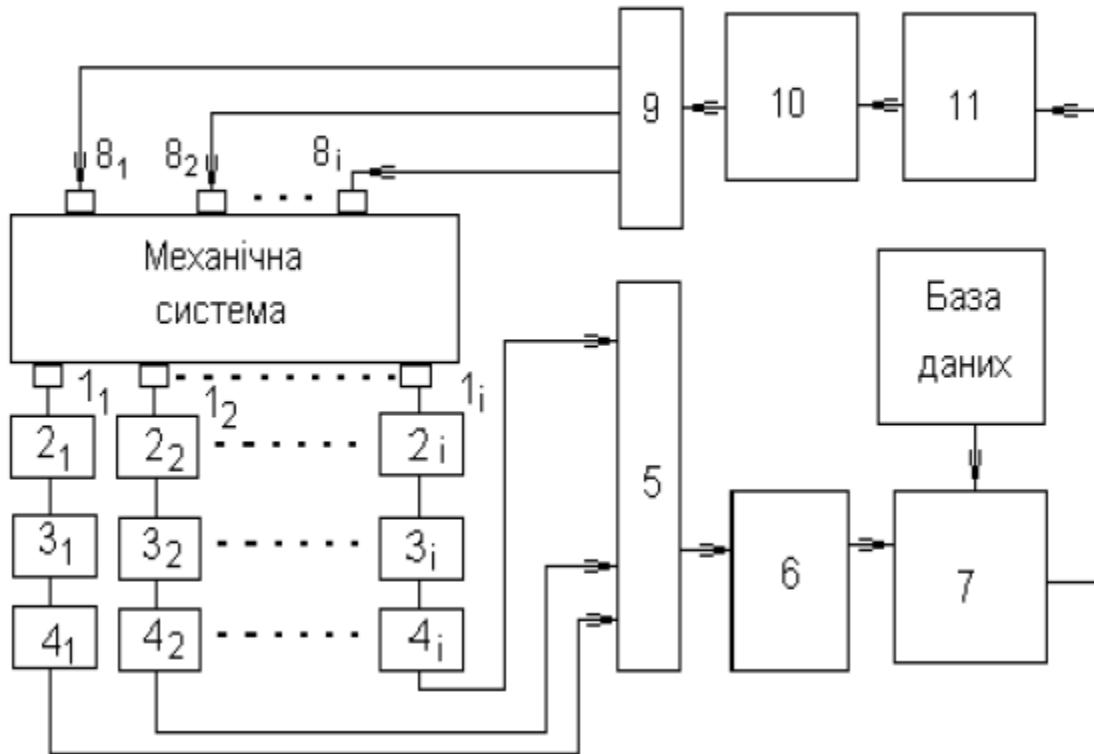


Рис. 3.6. Структура інформаційної системи контролю віброакустичних характеристик механічної системи:

1i – датчики-перетворювачі; 2i – смугові фільтри; 3i – вимірники параметрів віброакустичних сигналів; 4i – аналого-цифрові перетворювачі; 5 – комутатор; 6 – інтерфейс; 7 – комп'ютер; 8 – датчики вводу тестових сигналів; 9 – комутатор тестових сигналів; 10 – вихідний блок генератора тестових сигналів; 11 – блок формування тестових сигналів

3.3. Структура апаратних засобів безконтактної системи вібродіагностики

Для ефективного розв'язання задачі вібродіагностики використовується апаратура, що має різну структуру і містить різні функціональні модулі.

Механічні коливання, що генеруються механічними вузлами, можуть поширюватися по елементах машини і реєструватися на їхніх поверхнях. Для цього використовуються різні датчики (ємнісні, індуктивні, резистивні, електромагнітні). Однак останнім часом найбільшого поширення набули п'єзоелектричні датчики. Це

пов'язано з тим, що п'єзоелектричні датчики мають високу точність і чутливість вимірювань, дуже стабільні й водночас мають невеликі габарити та масу.

З розвитком обчислювальної техніки дедалі більше спеціалізованих завдань обробки вирішують цифрові засоби обробки. Такі системи прості в налаштуванні, стабільні в часі та легко модернізуються. Крім того, модернізація здебільшого стосується методів і алгоритмів, що використовуються для цифрового оброблення вихідного сигналу. Принципово.

Можливості та ефективність використання нових і традиційних методів обробки вібросигналів багато в чому залежать від параметрів і обмежень незмінної аналогової частини системи.

Розглянемо структуру такої системи на рис. 3.7.

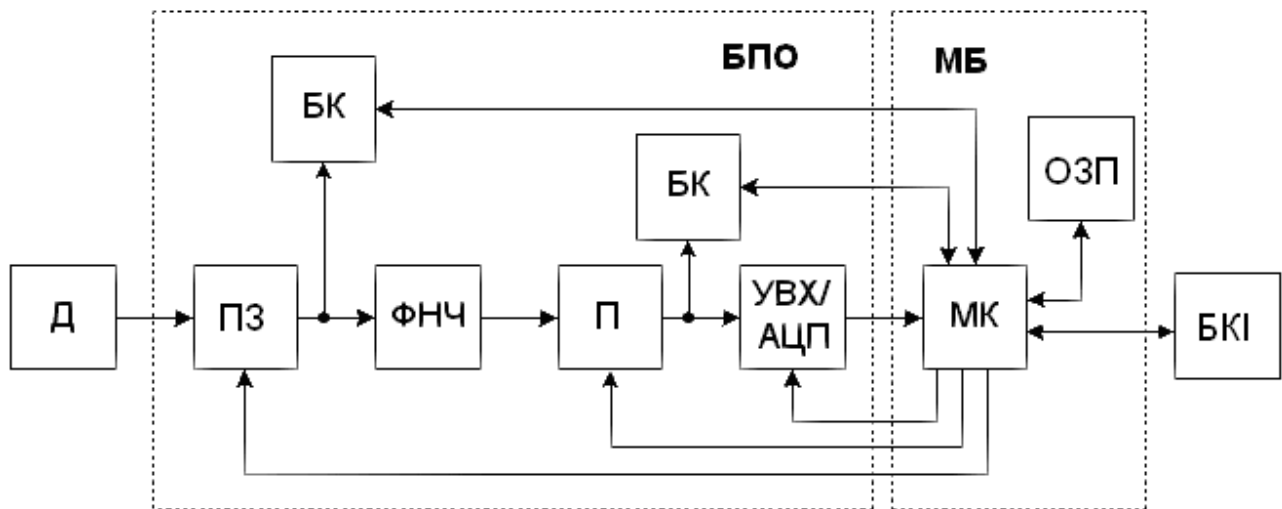
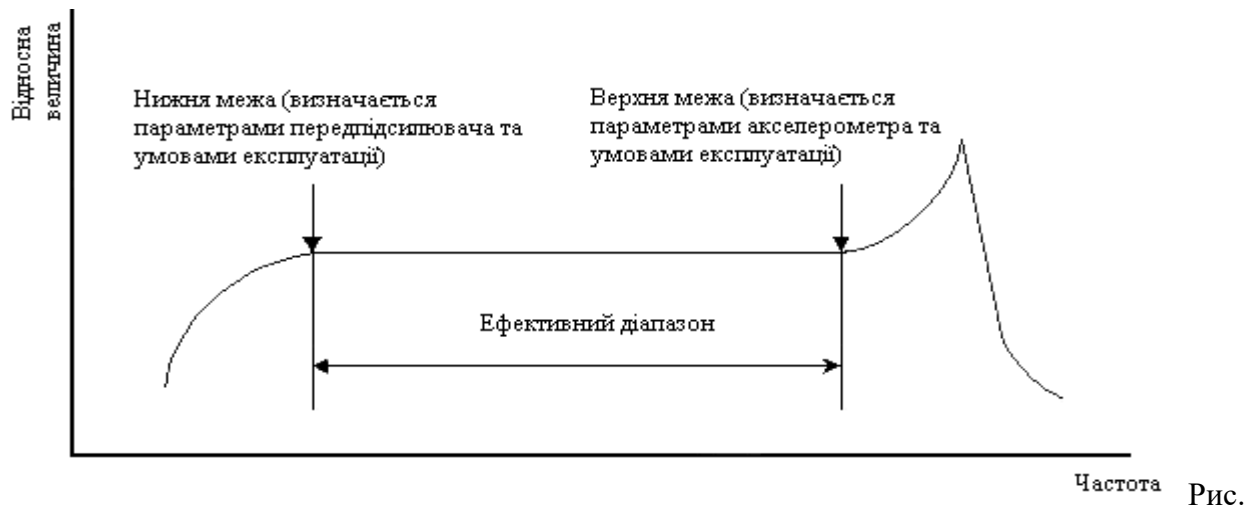


Рис. 3.7. Функціональна схема системи віброакустичної діагностики
де Д - датчик; БПО - блок попередньої обробки; ПЗ - підсилювач заряду; ФНЧ - фільтр нижніх частот; БК - блок компараторів; П - масштабний підсилювач;
МБ - мікропроцесорний блок; ПЗ/АЦП - пристрій вибірки-збереження / аналоговий цифровий перетворювач; МК - мікроконтролер; ОЗП - оперативно запам'ятовуючий пристрій; БКІ - блок клавіатури / індикації.

П'єзоелектричні акселерометри, які є різновидом п'єзоелектричних датчиків, зазвичай використовують для вимірювання вібрації. Частотну характеристику

акселерометрів показано на рис. 3.8.



3.8. Частотна характеристика акселерометра

Пік відгуку відповідає частотному резонансу датчика. Нижче ефективного діапазону чутливість низька і відгук нерівномірний. Вище цього діапазону відгук стає нерівномірним, і параметр стає нестабільним. Ефективний діапазон вибирається в центральній області, де відгук є рівномірним і гарантує стабільну роботу датчика в необхідному діапазоні частот. Під час установа датчика на об'єкт ефективний діапазон зменшується в кілька разів, а приріст характеристики, відповідний зниженню точності датчика, зміщується в бік нижчих частот, тому цю особливість необхідно враховувати під час вибору датчика.

Загальноприйнятий підхід полягає в тому, що для забезпечення заданого діапазону частот і похибки перетворення близько 1% резонансна частота датчика має бути щонайменше вдвічі вищою за верхню межу цього діапазону частот.

Сигнал п'єзоелектричного датчика-акселерометра (Е) у вигляді заряду, пропорційного віброприскоренню вхідного сигналу, надходить на вхід підсилювача заряду (УЗ), який перетворює заряд у пропорційну напругу.

Підсилювачі заряду, як правило, являють собою операційні підсилювачі зі зворотним зв'язком і мають ємність (рис. 3.9). Під час під'єднання УЗ до первинного перетворювача, що генерує заряд, на вхід підсилювача також

під'єднуються ємність з'єднувального кабелю, ємність первинного перетворювача (датчика) і паразитна вхідна ємність. Оскільки амплітуда вхідного сигналу змінюється в широкому діапазоні, потрібне підстроювання параметрів вимірювального каналу.

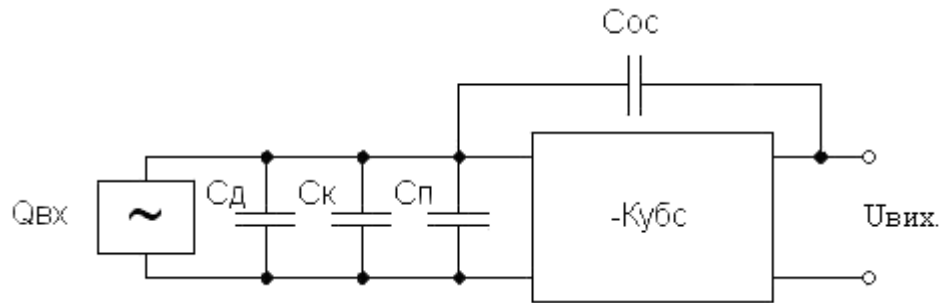


Рис. 3.9. Еквівалентна схема підсилювача заряду

Програмний коефіцієнт посилення автоматично регулюється мікроконтролером (МК) для забезпечення необхідного динамічного діапазону, не допускаючи при цьому перевантаження вхідних каналів.

Неповне використання динамічного діапазону (а на рис. 3.10) збільшує вплив завад від вимірювального каналу на результат вимірювання і неминує збільшує помилки під час подальшого перетворення сигналу в цифрову форму. У разі перевищення динамічного діапазону сигналу (б на рис. 3.10) відбувається спотворення форми сигналу і втрата інформації. На практиці вхідний сигнал нормується за допомогою коефіцієнта посилення, який охоплює весь динамічний діапазон вимірювального каналу і при цьому зберігає вихідну форму сигналу (рис. 3.10, в).

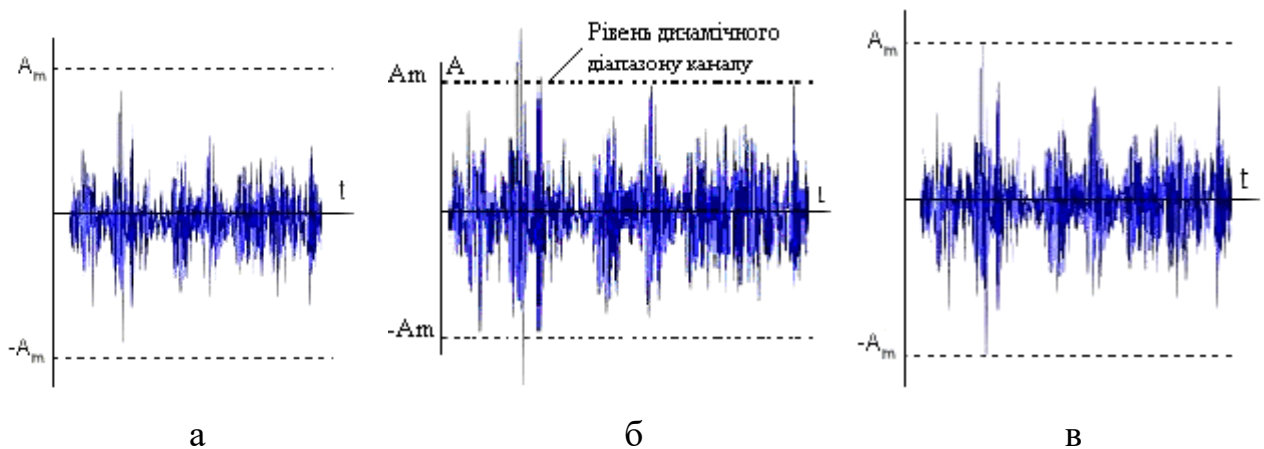


Рис. 3.10. Вихідний сигнал:

- а - неповне використання динамічного діапазону каналу;
- б - перевищення динамічного діапазону, яке приводить до спотворення форми сигналу; в - повне використання динамічного діапазону, сигнал передається без спотворень

Якщо сигнал з виходу ВП виходить за межі заданого діапазону, блок компараторів (БК) дає сигнал МК на зменшення коефіцієнта посилення ВП доти, доки сигнал повністю не задовольнить лінію передачі. Блок компаратора складається з двох компараторів, які контролюють рівні негативного і позитивного сигналів, виходи яких подаються на тригер УС.

Функціональна схема БК наведена на рис. 3.11.

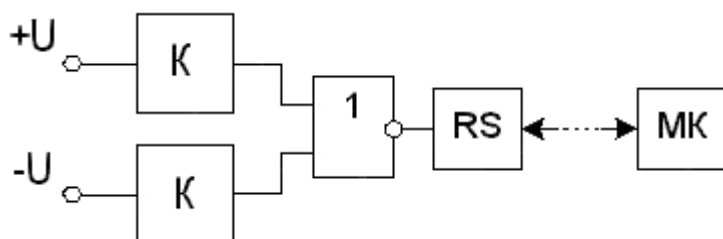


Рис. 3.11. Функціональна схема блоку компараторів

де К – компаратор; RS – RS-тригер; МК – мікроконтролер.

Масштабований таким чином програмний вихідний сигнал надходить на фільтр низьких частот (ФНЧ), де він фільтрується для придушення компонентів, що виходять за межі необхідного частотного діапазону. Цей діапазон значною

мірою визначається інформаційними складовими сигналу, що становлять інтерес для подальшого аналізу. Вибір і розрахунок фільтра нижніх частот ґрунтується на таких вимогах, як параметри фільтрації, точність фільтрації і коефіцієнт підсилення.

У смузі низьких частот характеристика фільтра Баттерворта найбільш наближена до ідеальної. На частотах поблизу точки зламу і в смузі затримки характеристика фільтра Баттерворта явно нижча, ніж у фільтра Чебишева з немонотонною характеристикою в смузі пропускання, але частотна характеристика першого краща (ближча до лінійної), ніж у фільтрів Чебишева, зворотного Чебишева і еліптичних фільтрів того ж порядку. Широко використовувані схеми фільтрів з імпульсним джерелом напруги (ВІС) забезпечують неінвертуюче посилення (позитивний коефіцієнт підсилення), що ідеально підходить для реалізації фільтрів нижніх частот; фільтр VSSO (рис. 3.12) забезпечує неінвертуючий коефіцієнт підсилення з мінімальною кількістю елементів. Він має низький загальний вхідний опір, малий розкид значень елементів і відносно високий коефіцієнт підсилення. Крім того, цей фільтр дуже простий в установці.

Після фільтра нижніх частот ослаблений сигнал надходить на підсилювач (А), який підсилює сигнал для повного використання динамічного діапазону каналу і зменшення похибки квантування рівня АЦП.

Коефіцієнт підсилення підсилювача програмно регулюється за допомогою мікроконтролера. Контроль виходу сигналу Р за встановлену межу також здійснюється за допомогою БК і програмного забезпечення.

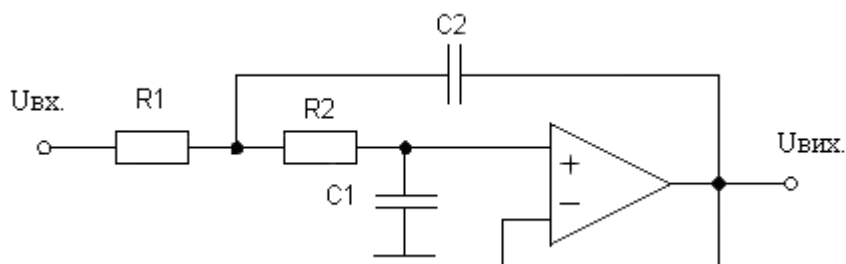


Рис. 3.12. Фільтр на ДНКН другого порядку

З виходу підсилювача сигнал надходить на аналого-цифровий перетворювач (АЦП); пристрій вибірки/зберігання використовується для захоплення вхідного сигналу під час перетворення АЦП. Від МК надсилається сигнал для запуску перетворення, і коли перетворення завершується, АЦП надсилає сигнал про те, що вихідний код готовий для зчитування МК. Більшість сучасних АЦП мають вбудовану ПЛІС.

Згідно з теоремою Котельникова, частота дискретизації сигналу повинна вдвічі перевищувати частоту сигналу. Тому при виборі АЦП слід враховувати його швидкодію: Розрядність коду АЦП відповідає повному діапазону аналогового сигналу і визначає роздільну здатність коду; АЦП замінюють неперервні аналогові сигнали дискретними і тому їм притаманна методична похибка. Похибка, що вноситься АЦП Похибка, що вноситься АЦП, дорівнює:

$$\delta_{\text{АЦП}} = 100\% / 2^n, \quad (3.1)$$

Клавіатура може керувати аналізом і збором вихідних даних вібрації, а також отримувати екранні повідомлення про параметри записаного вібраційного сигналу та іншу інформацію.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ВІБРОДІАГНОСТИКИ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ.

4.1. Вибір послідовного інтерфейсу з'єднання

Фірма MICROCHIP випускає 3 лінії 8-бітних КМОП мікроконтролерів, відомих як PIC16Fxx, PIC18Fxx й PIC17Fxx.

Усі мікроконтролери виконані за RISC технологією, мають схему запуску по включенню живлення, вартовий таймер, що програмується, біт захисту від зчитування, припустимий струм по кожному виході до 20 мА й низьке енергоспоживання - 2 мВ при живленні 5 В на тактовій частоті 4 МГц; 15 мкА при живленні 3 В на тактовій частоті 32 кГц й менше 3 мкА в режимі очікування.

Мікроконтролери CPIC16F877, MCP41050 та CPIC18F258, що використовуються у приладі, містять послідовний периферійний інтерфейс SPI (SerialPeripheralInterface), призначений для обміну даними один з одним.

Принцип роботи послідовного обміну даними, реалізованого у мікроконтролерах (рис. 4.1).

Один із пристроїв, що беруть участь в обміні даними, є ведучим, інший - веденим. Обмін здійснюється по чотирьох сигнальних лініях. Їх призначення зазначені в табл. 4.1.

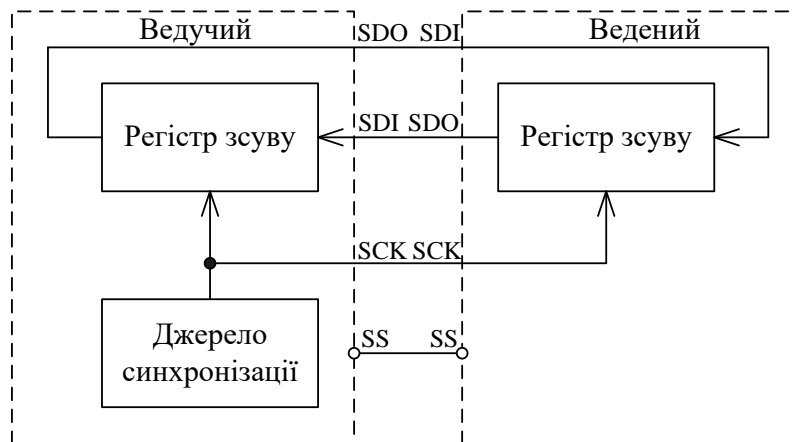


Рис. 4.1. Принцип роботи SPI

Таблиця 4.1

Призначення сигнальних ліній

| | |
|-----|---|
| SDO | Serial Data-Out (послідовне виведення даних) |
| SDI | Serial Data-In (послідовне введення даних) |
| SCK | SPI Clock (синхронізація) |
| SS | Slave Select (вибір веденого) |

Обидва пристрої, що приймають участь в обміні даними, містять регістр зсуву. Регістри з'єднуються в коло, як показано на з використанням відповідних входів SDI і виходів SDO. Зсув здійснюється по фронту імпульсу синхронізації, при цьому ведучий передає веденому один біт зі свого регістра зсуву, одержуючи біт з регістра останнього. Очевидно, якщо ведучий подасть на шину синхронізації SCK число імпульсів, рівне розрядності регістрів, то інформація з його регістра повністю передасться веденому, і навпаки. Розрядність переданих слів - 8 біт.

Для того щоб можна було апаратно вибрати одного з декількох ведених мікроконтролерів, використовується додаткова лінія інтерфейсу SS.

Крім цього, вибір веденого може також здійснюватися передачею ведучим адресного байта. Останній приймається всіма веденими й рівняється із привласненими їм адресами. При збігу ведений активує лінію свого інтерфейсу й здійснює необхідний обмін даними.

При організації зв'язку між ЕОМ та вимірником вібрації, що працює у режимі датчика, необхідно зробити вибір відносно інтерфейсу передачі даних від приладу до ЕОМ та у протилежному напрямі. Контролер CP PIC18F258, що використовується у приладі, має можливість передавати сигнали по інтерфейсу RS-232. Логічному „0” відповідає рівень сигналу 0 В, логічній „1” – 5 В. Цей інтерфейс не дозволяє передавати інформацію на великій відстані, тому що сильно піддається дії завад.

Інтерфейс повинен бути завадостійким, дозволяти здійснювати підключення декількох приладів та бути достатньо простим при реалізації.

Цим вимогам відповідає послідовний інтерфейс RS-485.

Інтерфейс RS-485 (інша назва - EIA/TIA-485) - один з найпоширеніших стандартів фізичного рівня зв'язку. Фізичний рівень - це канал зв'язку й спосіб передачі сигналу.

Мережа, побудована на інтерфейсі RS-485, являє собою прийомопередатчики, з'єднані за допомогою крученої пари - двох скручених дротів. В основі інтерфейсу RS-485 лежить принцип диференціальної (балансової) передачі даних. Суть його полягає в передачі одного сигналу по двох проводах. По одному дроті (умовно А) передається оригінальний сигнал, а по іншому (умовно В) - його інверсна копія. Якщо на одному дроті "1", то на іншому "0" і навпаки. Таким чином, між двома проводами крученої пари завжди є різниця потенціалів: при "1" вона додатна, при "0" – від'ємна.

Саме різницю потенціалів і передається сигнал (рис. 4.2).

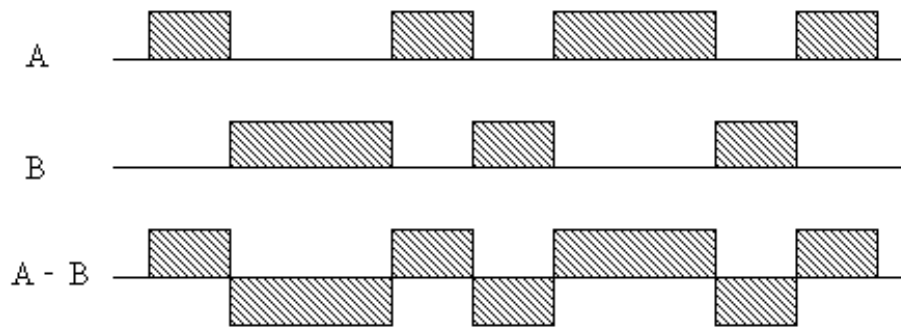


Рис. 4.2. Диференціальна передача даних

Такий спосіб передачі забезпечує високу стійкість до синфазної перешкоди. Синфазною називають перешкоду, що діє на обидва дроти лінії однаково. Електромагнітна хвиля, проходячи через ділянку лінії зв'язку, наводить в обох проводах потенціал. Якщо сигнал передається потенціалом в одному дроті щодо загального, як в RS-232, то наведення на дріт може створити сигнал відносно добре поглинаючого наведення загального ("землі"). Крім того, на опорі довгого загального дроту буде падати різниця потенціалів земель - додатковий джерело створень. А при диференціальній передачі створення не відбувається. Таким чином, якщо два дроти пролягають близько один до одного і перекручені, то наведення на обидва дроти однакові. Потенціал в обох однакових навантажених проводах змінюється однаково, при цьому інформативна різниця потенціалів залишається без змін.

RS-485 - напівдуплексний інтерфейс. Прийом і передача йдуть по одній парі дротів з поділом у часі. У мережі може бути багато передавачів, тому що вони можуть відключатися в режимі прийому.

Структурна схема такого інтерфейсу зображена на рис. 4.3.

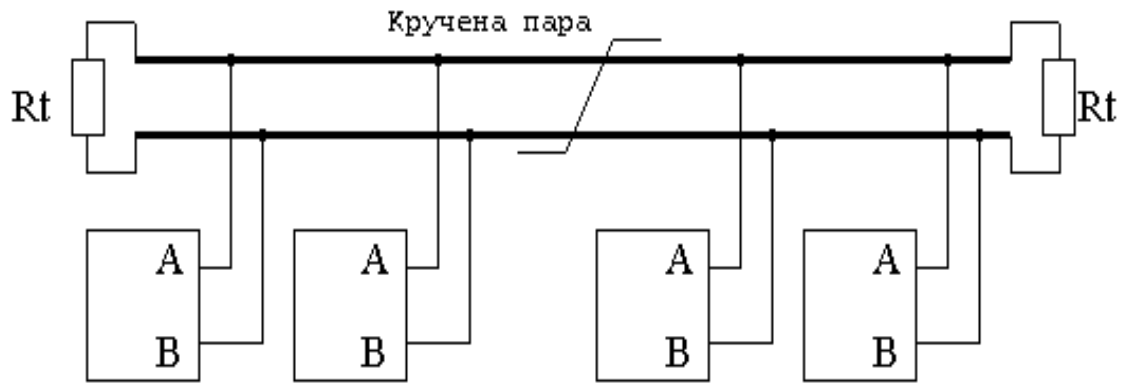


Рис. 4.3. Структурна схема підключення інтерфейсу RS-485

Всі пристрої підключаються до однієї крученої пари однаково: прямі виходи до одного дроту, інверсні - до іншого.

При великих відстанях між пристроями, зв'язаними по крученій парі й високих швидкостях передачі починають проявлятися так називані ефекти довгих ліній. Причина цьому - кінцевість швидкості поширення електромагнітних хвиль у провідниках. Швидкість ця істотно менше швидкості світла у вакуумі й становить більше 200 мм/нс. Електричний сигнал має таку ж властивість відбиватися від вільних кінців лінії передачі і її відгалужень. Для коротких ліній і малих швидкостей передачі цей процес відбувається так швидко, що залишається непоміченим. Якщо відстань досить велика, фронт сигналу, що відбився наприкінці лінії й повернувся назад, може спотворити поточний або наступний сигнал. У таких випадках потрібно придушувати ефект відбиття.

У будь-якій лінії зв'язку є такий параметр, як хвильовий опір Z_w . Він залежить від характеристик використовуваного кабелю, але не від довжини. Для крученої пари, що застосовується у системі, $Z_w = 120$ Ом. Якщо на вилученому кінці лінії, між провідниками крученої пари включити резистор з номіналом рівним хвильовому опору лінії, то електромагнітна поглинається на такому резисторі. Звідси його назви - резистор, що погодить, або "термінатор".

Максимальна швидкість зв'язку по специфікації RS-485 може досягати 10 Мбіт/сек.

4.2. Розробка головного модуля і модуля індикації пристрою вібродіагностики

Структурна схема пристрою вібродіагностики наведена на рис. 4.4. Модуль індикації розроблений на основі мікроконтролера PIC16F877 (DD1). Для індикації використовуються два восьмисегментних світлодіодних індикатори: один чотирьохрозрядний (HG1), один однорозрядний (HG2).

Однорозрядний індикатор відображає поточний режим роботи приладу. Режим роботи приладу детально розглянути в розділі.

Чотирьохрозрядний індикатор використовується для відображення поточного значення рівня вібрації в дБ для октавних смуг і виміру пікфактора, і в дБ(А) для виміру середнього рівня вібрації. Десяткова кома фіксована і розташована після третього розряду числа, тобто число представляється з точністю до десятих часток цілого.

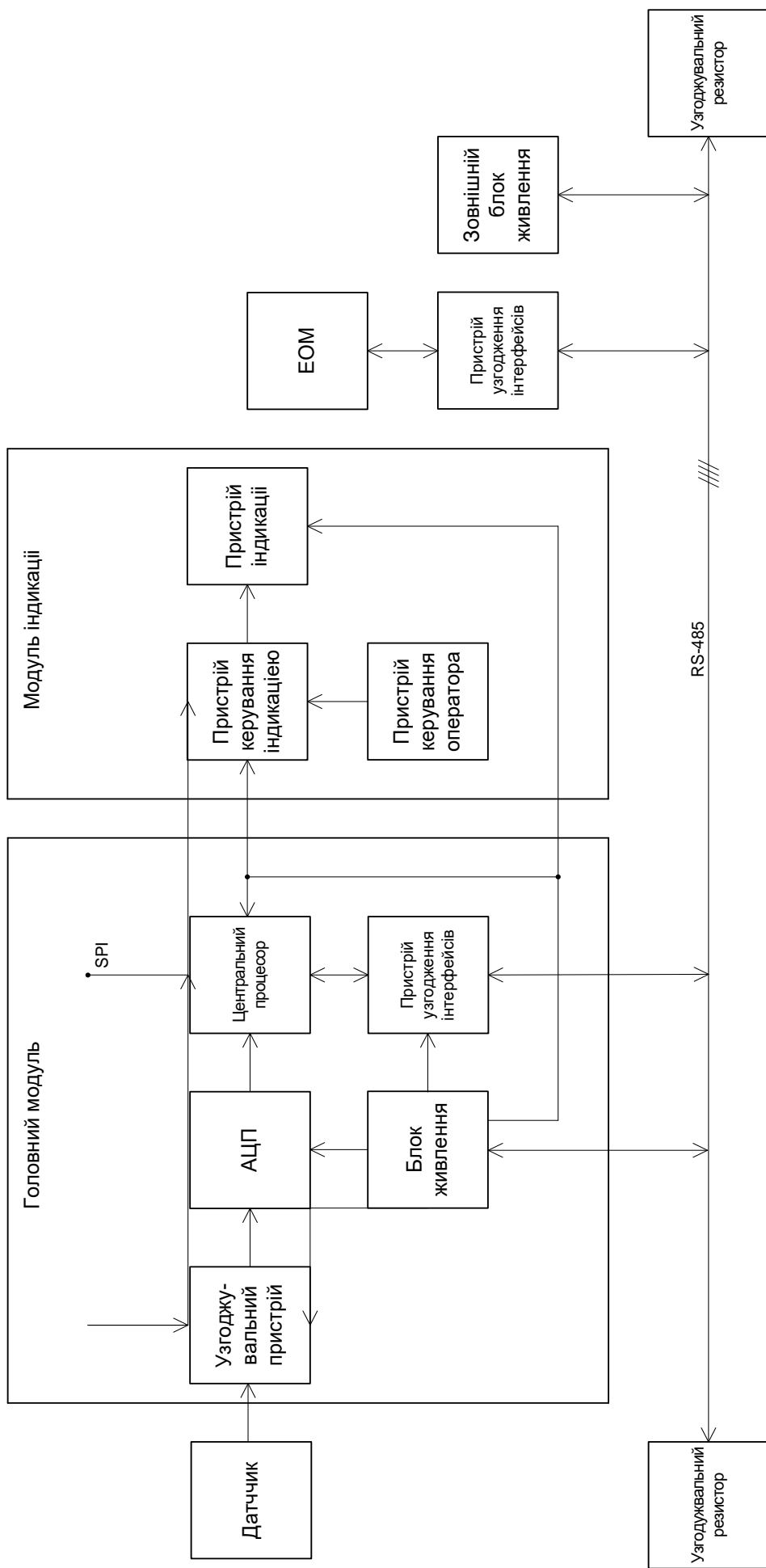


Рис. 4.4. Структурна схема пристрою вібродіагностики

Слід зазначити, що індикатор HG1 є динамічним, тобто з поділом шини між чотирма розрядами в часі. Тому в схемі й використовується контролер, що забезпечує роботу цього індикатора. Індикатор HG2 є статичним, і просто підключений анодними входами до порту D мікроконтролера.

У модулі індикації передбачено 4 світлодіоди (VD1..VD4). Один з них (VD1) запалюється, якщо на модуль надходить живлення. Інші 3 зарезервовані для майбутніх розробок.

Для керування приладом у модулі передбачено три кнопки (JP1..JP3). Дві з них (JP1, JP2) призначені для зміни режиму роботи, третя зарезервована для майбутніх розробок. Придушення дряк ітуконтактів здійснюється програмним способом.

Живлення й сигнали модуля надходять від рознімача XP1. До цього восьмиконтактного штиркового рознімача підключається кабель, що з іншої сторони підключається до головного модуля.

Принципова електрична схема модуля індикації представлена на рис. 4.5, а блок-схема його роботи – на рис. 4.6.

Головний модуль вимірювача вібрації складається із трьох функціональних блоків: джерела напруги, підсилювача й мікроконтролера (рис. 4.7).

Джерело напруги зібране на двох мікросхемах MC34063 фірми Motorola (DA2, DA3). Одна з них видає напругу +5 В, інша – 5 В. Схеми включення мікросхем взяті з відповідної технічної документації, розрахунок параметрів схеми наведений у розділі.

Підсилювач виконаний на операційному підсилювачі LM2902 фірми Philips. Фактично, у корпусі присутні чотири підсилювачі, але використовуються тільки три. Два підсилювачі виведені на насичення (DA4.2, DA4.3), і використовуються як джерела опорної напруги для АЦП мікроконтролера. Один підсилювач (DA4.1) включений за інвертуючою схемою. У вхідному ланцюзі підсилювача знаходиться резистор R1, у ланцюзі зворотного зв'язку – цифровий потенціометр MCP41050

фірми Microchip (DA1). Цифровий потенціометр керується мікроконтролером по інтерфейсу SPI.

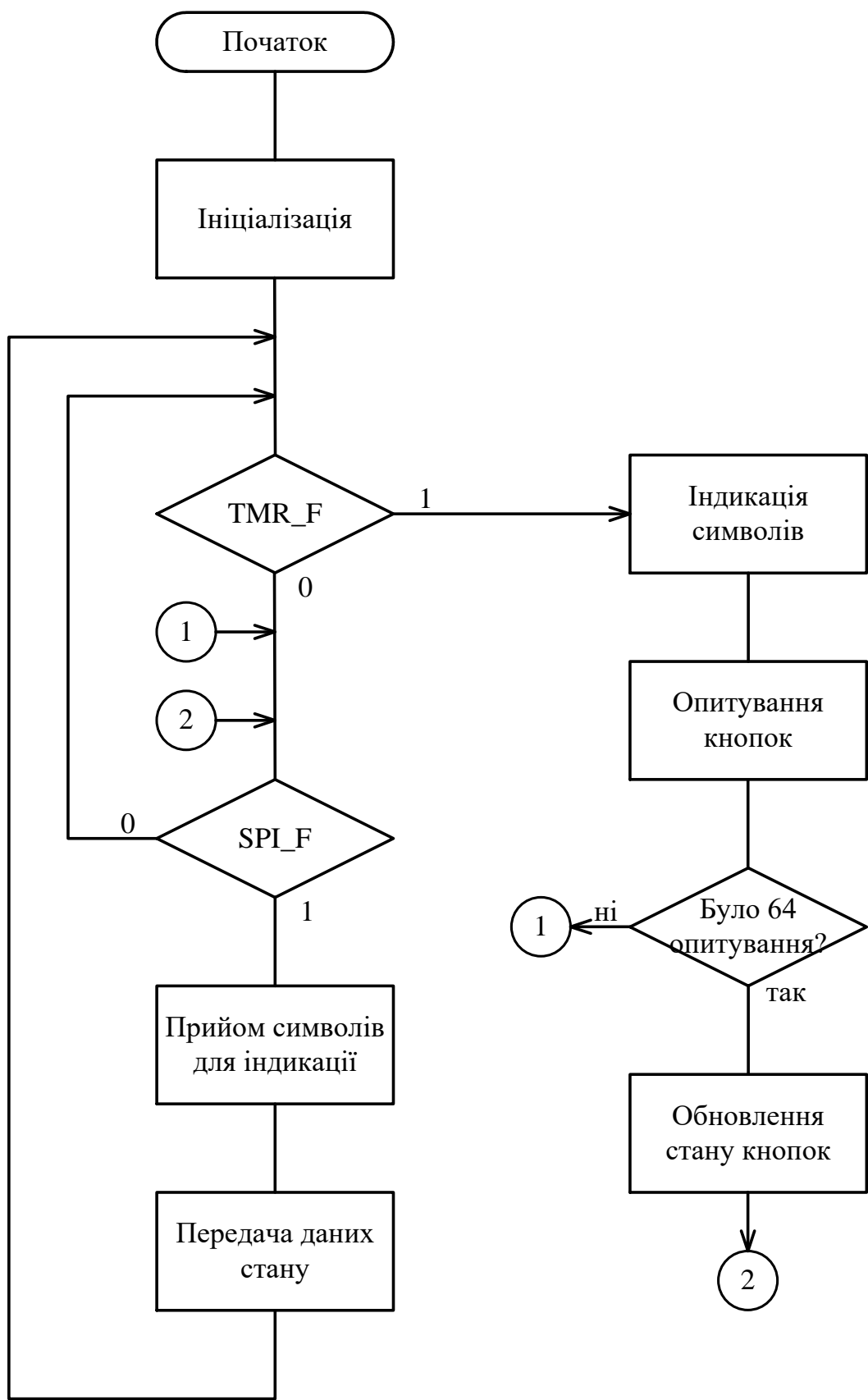


Рис. 4.6. Блок-схема роботи модуля індикації

Цифровий потенціометр дозволяє адаптивно міняти коефіцієнт підсилення, що дозволяє застосовувати вбудований у мікроконтролер 10-розрядним АЦП.

Для зв'язку приладу з ЕОМ використовується інтерфейс RS-245. Контролер підтримує інтерфейс RS-232 тільки на логічному рівні. Щоб одержати потрібні рівні напруги, використовується перетворювач рівнів MAX232 (DD1).

Модуль містить чотири рознімачі (XP1..XP4). Рознімач XP1 підключається до мікрофона. Через рознімач XP2 модуль зв'язується з ЕОМ. Рознімач XP3 підключається до батареї напругою +9В або до зовнішнього джерела живлення. Для зв'язку з модулем індикації використовується рознімач XP4.

Блок-схема роботи головного модуля наведена на рис. 4.8.

Модуль індикації виконує дві функції – відображає поточний стан пристрою й взаємодіє з користувачем за допомогою клавіш.

Для індикації передбачені два восьмисегментних світлодіодних індикатори й чотири світлодіода. На восьмисегментних індикаторах відображається режим роботи й поточне значення рівня вібрації.

Чотири розрядний індикатор HG1 працює в режимі ущільнення часу. Це реалізується в такий спосіб. Анодні виводи індикатора підключені до восьмирозрядного порту мікроконтролера. Кожен вивід відповідає одному сегменту. Аноди розрядів з'єднані паралельно по сегментно. Катодні виходи підключені до чотирьохрозрядів порту мікроконтролера. Кожен катодний вихід відповідає одному розряду. Таким чином, подаючи логічний нуль на катодні висновки ми активізуємо один розряд індикатора. Вся схема працює в такий спосіб:

- на всіх катодних висновках устанолюється «1»;
- на анодних висновках устанолюється код символу;
- на один катодний вивід виводиться «0»;
- операція повторюється для кожного розряду.

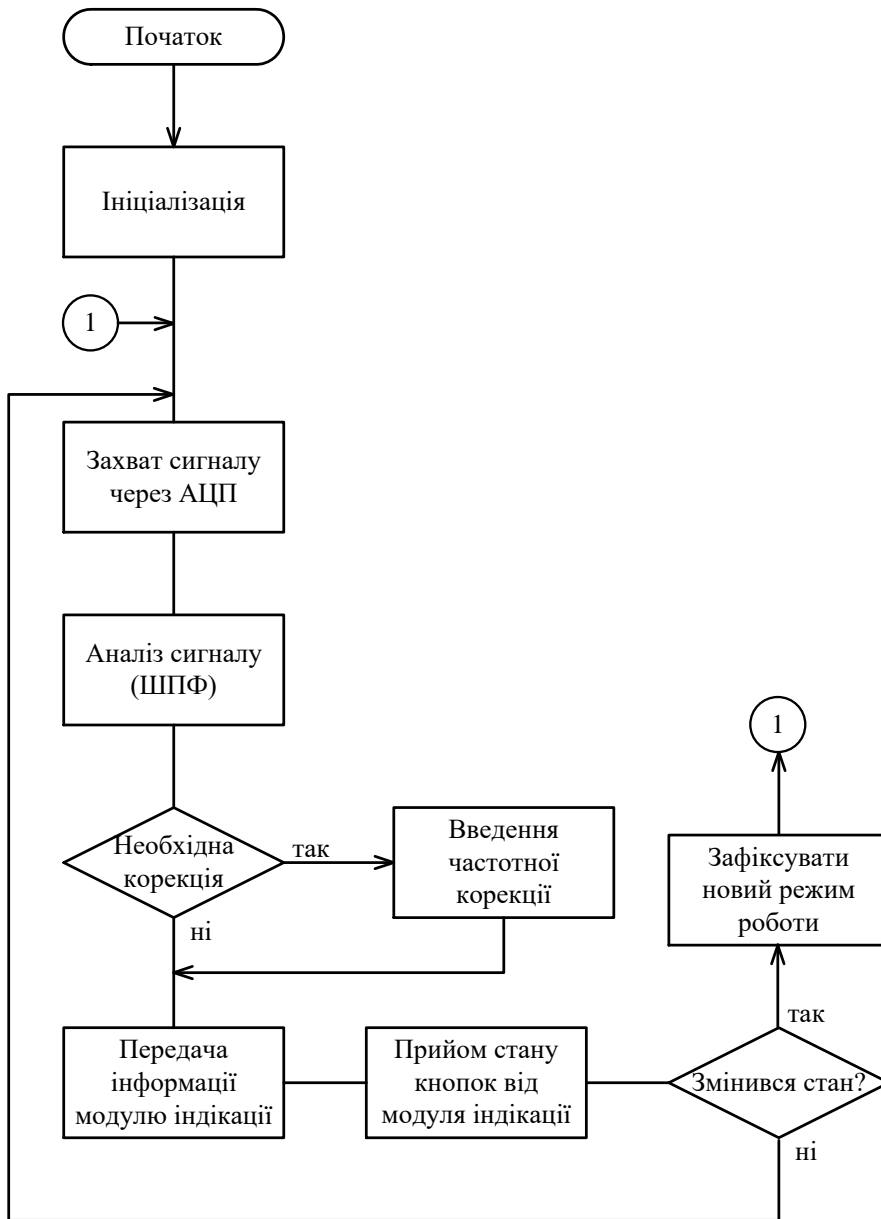


Рис. 4.8. Блок-схема роботи головного модуля

Необхідно забезпечити частоту перемикання між розрядами не менш 20 кГц, щоб усунути мерехтіння. Реально частота значно вище.

Головний модуль служить для захопту сигналу з АЦП і розрахунком ШПФ. Захват здійснюється через убудований 10-розрядний АЦП мікроконтролера.

Рахунок ШПФ й основна програма реалізовані мовою С. Існують компілятори з мови С у машинні коди мікроконтролерів серії PIC18. Для рахунку ШПФ

застосовується арифметика із плаваючою комою. Апаратно-функції в контролері не реалізовані, а емулюються програмно. У контролері присутній апаратний множник 8x8, що дозволяє значно підвищити швидкість рахунку.

Пристрій може вимірювати рівень вібрації в різних режимах. Поточний режим роботи відображається на індикаторі HG2. Перемикання режимів роботи здійснюється натисканням кнопок JP1 й JP2.

У табл. 4.2 зведено всі режими роботи і їх некоротке пояснення.

Таблиця 4.2

| Символ | Пояснення |
|--------|---|
| X | Режим підключення до ПЕОМ, калібрування, настроювання, відновлення ПО |
| L | Середнє значення рівня звукового тиску без частотної корекції |
| A | Середнє значення рівня звукового тиску із частотною корекцією по коригувальній кривій «А» |
| B | Середнє значення рівня звукового тиску із частотною корекцією по коригувальній кривій «В» |
| C | Середнє значення рівня звукового тиску із частотною корекцією по коригувальній кривій «С» |
| D | Середнє значення рівня звукового тиску із частотною корекцією по коригувальній кривій «D» |
| 1..8 | Середнє значення рівня звукового тиску в октавних смугах |
| P | Максимальне значення рівня звукового тиску, отримане за час виміру. |

Режим роботи пристрою

4.3. Розрахунок потужності схеми

Розрахунок потужності виконуємо виходячи з типових струмів споживання окремих елементів схеми (табл. 4.3 й 4.4).

Таблиця 4.3

Струми споживання елементів схеми модуля індикації

| Елемент | Струм споживання, мА | Кількість | Загальний струм споживання, мА |
|----------|----------------------|-----------|--------------------------------|
| DD1 | 0,8 | 1 | 0,8 |
| HG1 | 100,0 | 1 | 100,0 |
| HG2 | 80,0 | 1 | 80,0 |
| VD1..VD4 | 10,0 | 4 | 40,0 |

Таблиця 4.4

Струмиспоживання елементів схеми головного модуля

| Елемент | Струм споживання, мА | Кількість | Загальний струм споживання, мА |
|----------|----------------------|-----------|--------------------------------|
| DD1 | 0,5 | 1 | 0,5 |
| DD2 | 3,0 | 1 | 3,0 |
| DA1 | 1,0 | 1 | 1,0 |
| DA2, DA3 | 2,0 | 2 | 4,0 |
| DA4 | 0,5 | 1 | 0,5 |

Підсумовуючи струми всіх елементів одержуємо струм споживання

$$I = 230 \text{ мА.} \quad (4.1)$$

При напрузі живлення 5 В одержуємо потужність пристрою 1,15 Вт.

Друкована плата пристрою вібродіагностики наведена на рис. 4.9.

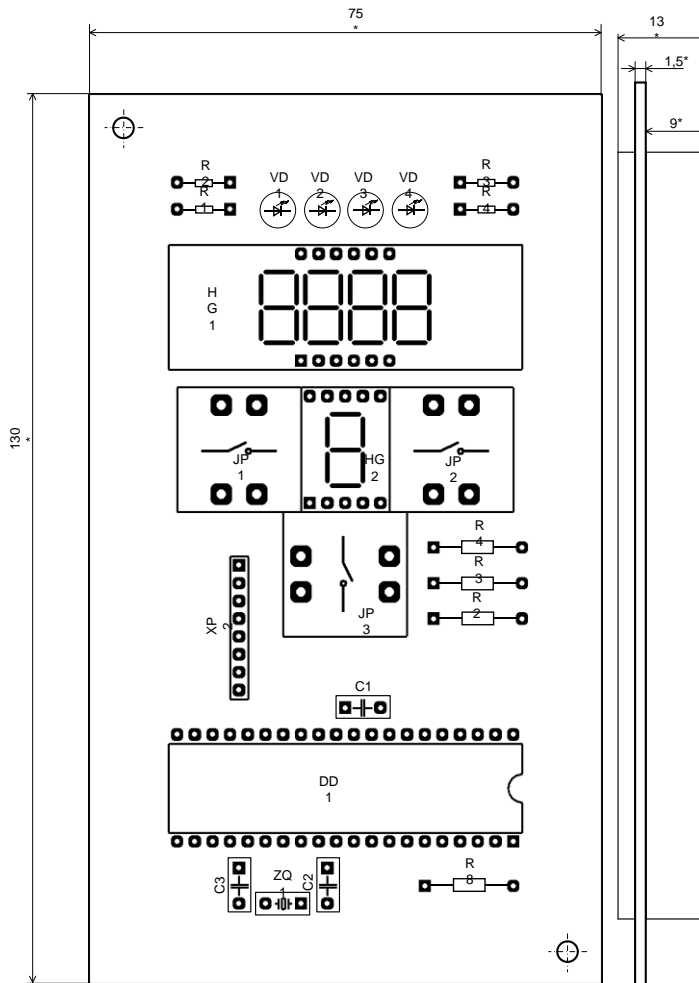


Рис. 4.9. Друкована плата пристрою вібродіагностики

4.4. Розрахунок джерела напруги

Джерело напруги будується на мікросхемах MC34063 фірми Motorola. Застосування таких мікросхем дозволяє одержати необхідну напругу +5 В и -5 В при вхідній напрузі від 6 В до 20 В. Це важливо при живленні від батарей, тому

щонапругабатареїможезначномінятися в міруїрозряду. При живленнівідзовнішньогоджерелазастосуванняподібнихмікросхемвигіднотим, що не потрібновисокоїточностіджереланапруги.

Типова схема підключення MCP34063 показана на рис. 4.10.

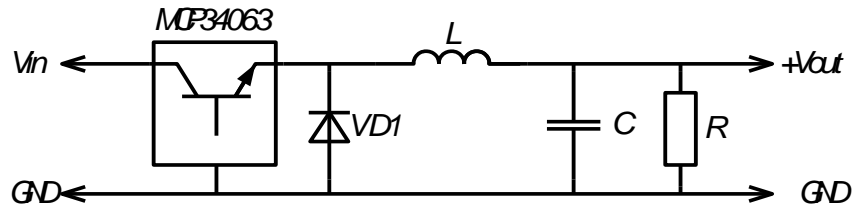


Рис. 4.10. Схема підключення MCP34063 у режимі Step-Down

Крім того, застосування MCP34063 дозволяєодержатиінверснупругу, необхідне для живленняопераційногопідсилювача.

Типова схема такого підключення показана на рис.4.11.

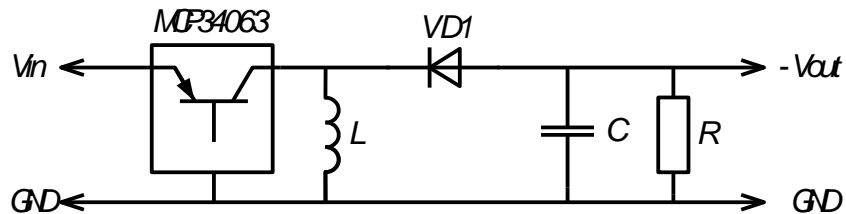


Рис. 4.11. Схема включення MCP34063 у режиміInverting

Зробиморозрахунокпараметрівсхеми.

Вхіднідані: бажанавихіднапруга $V_{out} = 5$ В, мінімальнавихіднапруга $V_{in} = 7$ В, мінімальна частота коливань $F_{min} = 200$ кГц.

З довідникаотримуємо $V_{sat} = 1,5$ В.

Відношеннячасіввмикання/вимикання:

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{V_{out} + V_F}{V_{in} - V_{sat} - V_{out}} = \frac{5 + 0.7}{7 - 1 - 5} = 5.7. \quad (4.2)$$

$$t_{on} + t_{off} = \frac{1}{200000} = 5 \text{ мкс.} \quad (4.3)$$

Тоді з (4.2) та (4.3) час вимикання:

$$t_{off} = \frac{t_{on} + t_{off}}{\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1} = \frac{5}{5.7 + 1} = 0.746 \text{ мкс,} \quad (4.4)$$

$$t_{on} = (t_{on} + t_{off}) - t_{off} = 4.254 \text{ мкс.} \quad (4.5)$$

Значенняємностідорівнює:

$$C = [4 \cdot 10^{-5} \cdot t_{on}] = 0,4 \cdot 4,254 \cdot 10^{-6} = 1,72 \text{ мкФ.} \quad (4.6)$$

Значенняіндуктивностідорівнює:

$$L_{min} = \left[\left(\frac{V_{in} - V_{sat} - V_{out}}{2 \cdot I_{out}} \right) \cdot t_{on} \right] = \frac{7 - 1 - 5}{2 \cdot 0,5} \cdot 4,254 \cdot 10^{-6} = 4,27 \text{ мкГн.} \quad (4.7)$$

Аналогічніноміналиелементіввикористовується і для схемивключення, щоінвертує.

4.5. Розрахунокнадійностісхеми

Розрахунок надійності виконуємо з того припущення, що відмова хоча б одного елемента порушує працездатність всієї схеми.

Інтенсивність відмов схеми дорівнює сумі інтенсивностей відмов її компонентів. Інтенсивності відмови компонентів наведені в табл. 4.5

Інтенсивності відмов компонентів

| Тип елемента | Кількість елементів, шт. | Інтенсивність відмов 10^{-6} год ⁻¹ |
|-------------------------|--------------------------|--|
| Інтегральні мікросхеми | 7 | 4 |
| Конденсатори | 17 | 0,05 |
| Резистори | 16 | 0,2 |
| Діоди | 6 | 0,25 |
| Світлодіодні індикатори | 2 | 1 |
| Кварц | 2 | 16 |
| Рознімачі | 2 | 0,062 |
| Пайки | 238 | 0,01 |

Сумарна інтенсивність відмов:

$$\lambda = (7 \cdot 4 + 17 \cdot 0,05 + 16 \cdot 0,2 + 6 \cdot 0,25 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 16 + 2 \cdot 0,062 + 238 \cdot 0,01) \cdot 10^{-6} \approx 70 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}. \quad (4.8)$$

Тоді з (4.7) напрацювання на відмову

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{70 \cdot 10^{-6}} = 14285 \text{ год}. \quad (4.9)$$

4.6. Розрахунок часу автономної роботи виробу

Низьке енергоспоживання – це дуже важливий фактор для систем з автономним живленням. Тривалість часу роботи батарей безпосередньо пов'язана з енергоспоживанням.

Розрахуємо час автономної роботи виробу від одного елементу живлення типу „крона” ємністю 1200 мА/год.

Час автономної роботи розраховується як відношення ємності батареї до споживаного виробом струму за формулою:

$$t_{\text{авто}} = \frac{\tilde{N}_{\text{bat}}}{I}, \quad (4.10)$$

де C_{bat} – ємність елемента живлення, I – струм, що споживається приладом.

Враховуючи (3.1), маємо:

$$t_{\text{авто}} = \frac{\tilde{N}_{\text{bat}}}{I} = \frac{1200}{230} = 5.22 \text{ год.} \quad (4.11)$$

4.7. Розрахунок елементів кварцового генератора

Кварцовий генератор сконструйований для паралельного режиму роботи кварцового резонатора. Для правильної роботи кварцового генератора потрібні навантажувальні конденсатори.

Значення навантажувальних конденсаторів залежать від навантажувальної ємності резонатора C_L , обумовленою документацією на резонатор.

Загальна ємність конденсаторів підключених між виводами кварцового генератора повинна бути дорівнює навантажувальній ємності резонатора, і визначається за формулою (4.12). Паразитна ємність визначається ємністю виводів резонатора і ємністю друкованого монтажу.

Звичайно загальне значення паразитної ємності дорівнює 3-5 пФ. Схема підключення кварцового резонатора й навантажувальних конденсаторів показана на рис. 4.13.

$$C_L = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} + C_{\text{пар}}, \quad (4.13)$$

Прийmemo C1 рівним C2, тоді з (4.11) отримаємо:

$$C_1 = C_2 = 2 \cdot (C_L - C_{\text{пар}}) = 2 \cdot (20 - 5) = 30 \text{ нФ}, \quad (4.13)$$

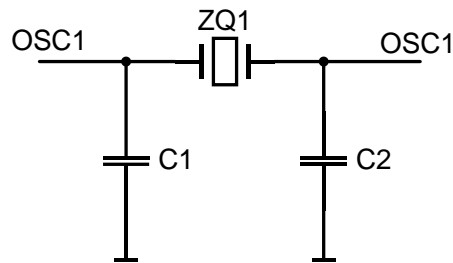


Рис. 4.11. Схема підключення кварцового резонатора

При необхідності підстроювання робочої частоти кварцового генератора паралельно C2 може бути підключений конденсатор, що підстроюється.

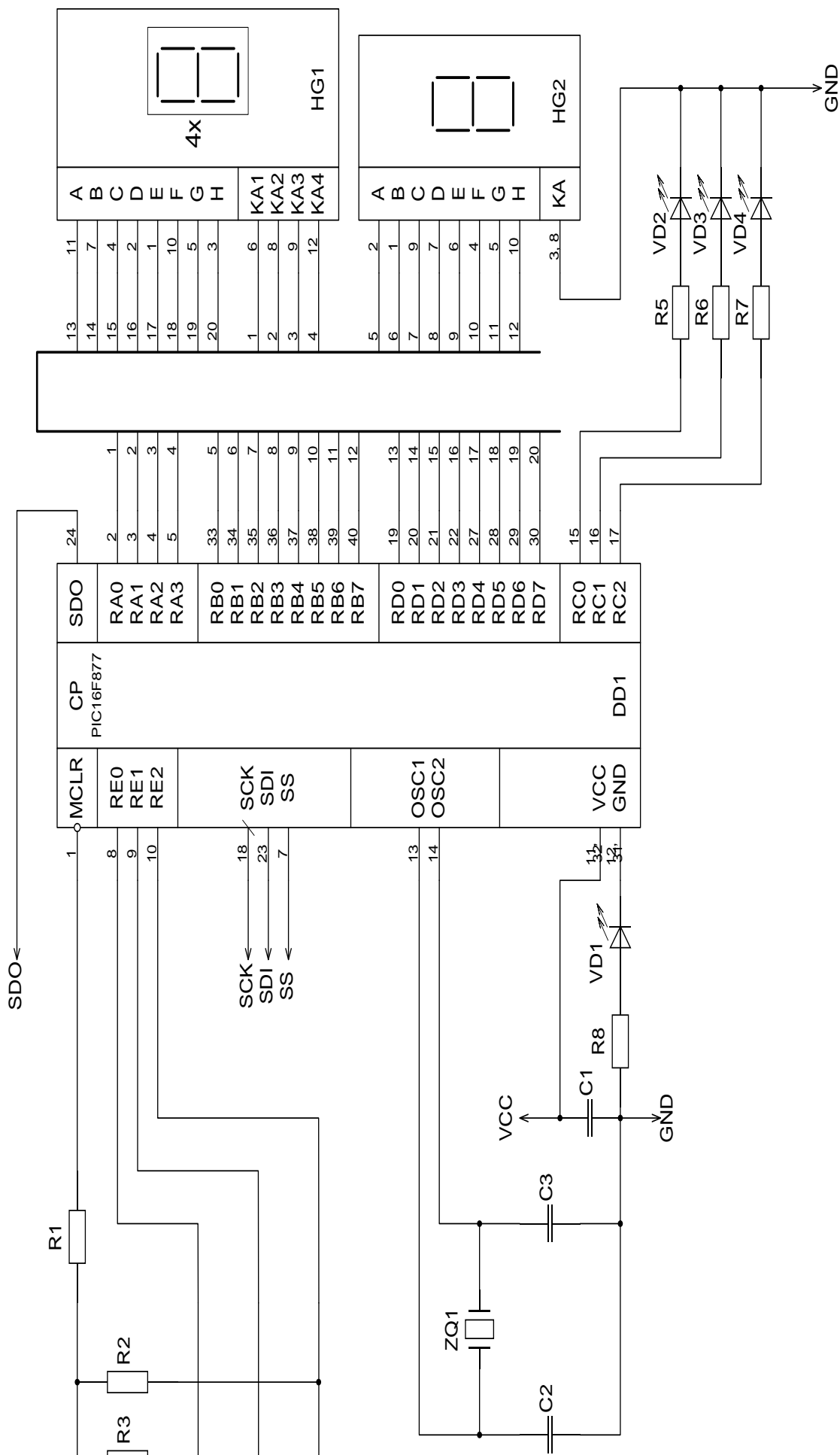


Рис. 4.5. Принципова електрична схема модуля індикації

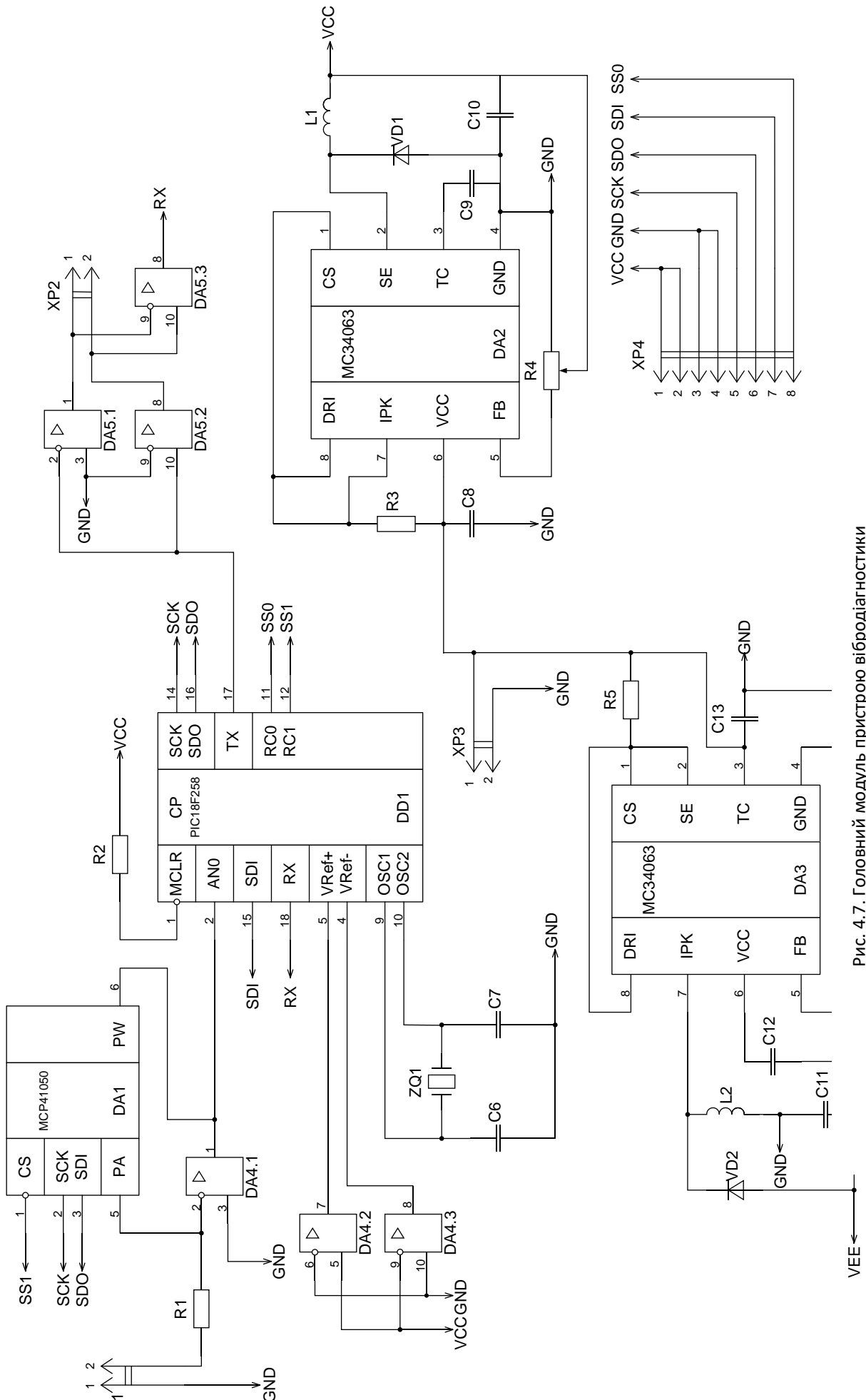


Рис. 4.7. Головний модуль пристрою вібрадіагностики

ВИСНОВКИ

У дипломному проекті розроблено безконтактну систему вібродіагностики, призначену насамперед для оцінки параметрів вібрації авіаційних двигунів. Розглянуто основні принципи побудови стаціонарної системи вібродіагностики та запропоновано сучасний ультразвуковий метод для поглибленого контролю вібрацій авіаційних двигунів та іншої авіаційної техніки.

Перспективи розвитку стаціонарної системи вібромоніторингу пов'язані з розвитком можливостей мікрокомп'ютерів. Цей розвиток може призвести до поділу функцій вимірювального блоку і діагностичного центру. Вимірювальний прилад міг би взяти на себе функцію моніторингу і зв'язуватися з діагностичним центром тільки за появи несправності з метою її ідентифікації. У цьому разі очевидно, що одна діагностична система може працювати з кількома вимірювальними приладами і контролювати стан обладнання. Кількість блоків вимірювання та аналізу сигналів у стаціонарній системі зазвичай визначається числом контрольних точок і максимально допустимими інтервалами між вимірюваннями.

Слід зазначити, що дане обладнання може бути використано для оцінки параметрів вібрації без необхідності демонтажу авіаційних двигунів. Для більш детальної оцінки вібраційного моніторингу слід використовувати стаціонарні інформаційно-вимірювальні системи відповідно до рекомендацій і технічних вказівок щодо точок вимірювання параметрів вібрації для конкретних авіаційних двигунів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. "Методи вібродіагностики в енергетичному обладнанні" - Іванов В.В., Григоренко А.Б., Науковий вісник Національного університету "Львівська політехніка", 2010.
2. "Сучасні технології моніторингу вібрації роторних машин" - Петров О.М., Іваненко С.В., Технічні науки та технології, 2015.
3. "Моделювання та аналіз механічних коливань в турбомашинних агрегатах" - Сидоренко О.І., Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, 2018.
4. "Сучасні технології вимірювання вібрації в авіаційній техніці" - Гриценко П.П., Авіаційна техніка та технології, 2012.
5. "Вібродіагностика електромеханічних систем суден" - Коваль В.М., Техніка, енергетика, транспорт, 2017.
6. "Системи вимірювання і моніторингу в авіаційному обладнанні" - Лисенко Д.С., Технічна діагностика та неруйнівний контроль, 2014.
7. "Виброметрія в сучасних умовах" - Мельников С.О., Технічні науки: нові ідеї та рішення, 2020.
8. "Методи і системи діагностики вібрації машин та обладнання" - Кравченко О.П., Збірник наукових праць Харківського політехнічного інституту, 2011.
9. "Вібраційна діагностика електроенергетичних систем" - Попов С.В., Електроенергетика та електротехніка, 2016.
10. "Аналіз та діагностика вібрацій в роторних системах" - Литвиненко Г.О., Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 2019.

