

УДК 53.08:620.178.5

Стахова А.П., к.т.н.,
orcid.org/0000-0001-5171-6330,
Паращанов В.Г., к.т.н.,
orcid.org/0000-0001-9095-8586

ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВІБРОМОНІТОРИНГУ СТАНУ АВІАДЕТАЛЕЙ

Національний авіаційний університет

sap@nau.edu.ua

Вступ

Щорічно відбуваються авіаційні події із втратами техніки та людських життів. Безпека польотів значною мірою визначається надійністю роботи всіх агрегатів [1]. Сучасні літальні апарати (ЛА) мають велику кількість агрегатів, пристроїв, систем, приладів, за допомогою яких здійснюється автоматичне та автоматизоване керування кермовими поверхнями, шасі, силовою установкою, засобами зв'язку та навігації, радіолокації, системами життєзабезпечення екіпажу та пасажирів тощо [2]. Складність і важливість завдань, що вирішуються за допомогою ЛА комплексу, передбачають автоматизацію бортових систем з високим ступенем живучості, безпеки, надійності та економічності функціонування. Поряд з кількісним зростанням та розширенням можливостей застосування перед авіаційною наукою та промисловістю стоять завдання значного покращення техніко-економічних характеристик літаків.

Удосконалення систем управління сучасних літаків різними автоматичними пристроями поставили перед конструкторами важкі завдання щодо безпеки польоту у разі відмови цих пристроїв. Система керування літаком повинна забезпечувати керування на всіх режимах польоту з необхідною точністю. Безперервне збільшення кількості функцій, що виконуються автоматичними пристроями, супроводжується збільшенням різноманітних датчиків, перетворювачів, обчислювачів, виконавчих пристроїв та інших елементів автоматичного обладнання. Що у свою чергу

висуває високі вимоги до деталей авіаційних агрегатів.

Одним із методів забезпечення відповідності технічного стану літальних апаратів вимогам міцності, прийнятим нормам та правилам є виявлення конструктивних та технологічних дефектів планера, агрегатів та систем. Розв'язання задачі контролю дефектів у конструкціях літаків та космічних апаратів досягається за результатами вібраційних випробувань [3,4]. Такими випробуваннями є контрольні модальні випробування літаків і динамічні випробування, що є складовою їхнього наземного експериментального відпрацювання.

Під час розробки нових об'єктів техніки динамічні випробування проводять у процесі розробки, що дозволяє виявляти конструктивні недоліки. А для забезпечення безпеки та якості функціонування техніки при її експлуатації необхідне проведення процедур управління, діагностики та захисту, що потребує точних вимірів, реєстрації та аналізу динамічних процесів (вібраційних та ударних сигналів).

Сьогодні не можна назвати практично жодного об'єкта контролю чи виробничого процесу, який не відчував би впливу вібраційних, ударних чи акустичних навантажень. Дослідження коливальних процесів становлять великий інтерес для всіх галузей народного господарства – металургії, енергетичного машинобудування, ракетної техніки тощо [3,4]. Тому найпоширенішим із усіх видів випробувань є вібраційний вплив з розгорненням по частоті.

Аналіз публікацій, присвячених цій тематиці, дозволив скласти перелік дефектів та встановити причини та наслідки їх виникнення. Наприклад, у роботах [5-8] про появу тріщин та руйнувань у конструкції судять щодо зміни її власних частот, форм та декрементів коливань. У [6] для виявлення пошкоджень пропонується використовувати коригування матриць інерції та жорсткості конструкції зі змін власних частот системи через появу дефектів. Метод виявлення місцевих пошкоджень композитних конструкцій щодо зміни власних частот і параметрів згасання, що відповідають різним формам коливань, розроблено у [8].

Постановка завдання

Актуальним стає вирішення завдання подальшого розвитку методів та створення пристроїв реєстрації, аналізу та управління динамічними процесами для підвищення якості динамічних випробувань, вібраційної діагностики та віброзахисту машин та обладнання на етапі розробки та експлуатації. Отже, у ході виконання роботи було проведено огляд та аналіз сучасних засобів вимірювання вібрацій та шуму за віброакустичними параметрами. Поставлено актуальне завдання проектування та дослідження системи моніторингу віброакустичних параметрів, в якій присутні вплив параметрів вібрації та шуму.

Метою роботи є розробка системи моніторингу віброакустичних параметрів стану авіадеталей.

Основна частина

На сьогоднішній день кількість приладів та допоміжного обладнання для вимірювання віброакустичних параметрів налічує сотні видів. Вони різняться точністю, вартістю, наявністю різного функціоналу. Для забезпечення безпеки експлуатації об'єктів техніки необхідне проведення періодичної діагностики, яка дозволяє виявляти несправності машин, що зароджуються, задовго до того моменту, коли відмова стає неминучістю, тобто забезпечувати експлуатацію обладнання за техніч-

ним станом. Завдяки величезній інформаційній місткості віброакустичних процесів, що супроводжують функціонування деталей та використання обчислювальної техніки, вимога підвищення якості, надійності експлуатації деталей висуває на передній план методи вібраційної діагностики. Аналіз робіт у галузі вібродіагностики [9-13] показав, що переважна більшість робіт присвячена аналізу процесу генерації вібраційних сигналів дефектами деталей машин, формуванню еталонного спектра та методам порівняння еталонного та поточного спектрів. У той же час для підвищення якості вібраційної діагностики, особливо при діагностиці дефектів, що зароджуються, необхідно розробляти нові підходи для розробки пристроїв для реєстрації, аналізу та управління динамічними процесами, що підвищують якість динамічних випробувань, вібраційної діагностики та віброзахисту деталей машин і обладнання на етапі розробки та експлуатації.

При дослідженні параметрів вібрації використовують два принципи виміру – кінематичний та динамічний. Кінематичний принцип полягає у тому, що вимірюються координати точок досліджуваного об'єкта щодо обраної нерухомої системи координат. Динамічний принцип ґрунтується на вимірюванні параметрів вібраційного процесу щодо нерухомої системи відліку, в більшості випадків центру ваги інерційного елемента датчика. Іншими словами, динамічний принцип вимірювання вібрації забезпечується за рахунок використання інерційної маси, закріпленої на пружному підвісі, який при досить високих частотах вібрації зберігає інерційний елемент практично в стані спокою.

Реалізувати описані принципи вимірювання можна за допомогою контактних та безконтактних методів вимірювання вібрації. При застосуванні практично будь-яких (крім індукційних) датчиків вібрації вихідні сигнали з них не перевищують кількох десятків мілівольт. Тому вихід дат-

чика підключається до пристрою підсилення та нормування сигналу вимірювальної інформації.

На сьогоднішній день більшість вимірювань вібраційних процесів здійснюється за допомогою датчиків вібраційних прискорень (акселерометрів) [14-16], а прискорення перетворюють у віброшвидкість, вібропереміщення електричними методами. У даній роботі ми наводимо приклад розробки системи вимірювання параметрів вібрації з використанням п'єзоакселерометра. Прилад дозволить вимірювати вібропереміщення, віброшвидкість та віброприскорення. Ще однією відмінністю є можливість передачі результатів вимірювань на відстань. Поєднання аналогової та цифрової частин дозволяє створити прилад актуальний на сьогодні, як в економічному, так і в технічному плані.

Форма і частотний склад вібраційних процесів визначається характером збуджувачих сил і передачею цих збуджень до того місця, де розташовується первинний вимірювальний перетворювач. У більшості випадків форма сигналу має вигляд складних коливань, які містять детерміновану і випадкову складові вібраційного процесу. Як форма, так і спектральний склад залежать від вимірюваного параметра вібрації. На практиці вимірюють переміщення, швидкість чи прискорення.

Вібрація характеризується частотою f , тобто числом коливань за секунду (Гц), амплітудою A , тобто зсувом хвиль, або висотою підйому від положення рівноваги (мм), швидкістю V (м/с) – швидкість руху точки або системи під дією вібрації, і прискоренням – прискорення руху точки або системи під дією вібрації. Абсолютні значення параметрів, що характеризують вібрацію, змінюються в широких межах, тому використовують поняття рівня параметрів, що є логарифмічні відношення значення параметра до опорного або порогового його значення.

Даний прилад побудований на основі п'єзоелектричного перетворювача, що, як відомо, найбільш широко застосовують для вимірювань вібраційних процесів.

Вони за своїми технічними характеристиками перевершують всі інші види віброперетворювачів, тому що мають переваги: досить високу чутливість, широкий частотний та динамічний діапазони вимірювань, відносно невеликі розміри та масу, високу термостійкість та віброміцність.

П'єзоелектричні віброперетворювачі (ВП) – це ВП, в яких у якості чутливого елемента (ЧЕ) використовуються монокристалічні або полікристалічні матеріали, що мають п'єзоелектричні властивості [17-18].

Характеристики чутливого елемента залежать не тільки від величини m , а й від жорсткості K перетворювача, а також від наявності демпфування (тобто опору руху по швидкості).

Сила пружності F_y діє на інерційну масу, як відомо, дорівнює

$$F_y = -kx, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт жорсткості, Н/м; x – величина зміщення, м.

Характерною особливістю віброакселерометрів є те, що вони розглядаються як системи з кінематичним збудженням. У таких системах вимірювана величина діє не так на ЧЕ, а на його основу.

Введемо дві системи координат: абсолютну X , розташовану довільно, і систему Z , жорстко пов'язану з основою вібродатчика. Тоді

$$\begin{aligned} F_y &= -k(y-x), \\ F_d &= -r \left[\frac{d(y-x)}{dt} \right], \\ F_{in} &= m \left[\frac{d^2 y}{dt^2} \right]. \end{aligned}$$

де F_y – сила пружності, F_d – демпфуюча сила, F_{in} – інерційна сила, r – коефіцієнт демпфування. Відповідно до принципу Даламбера:

$$F_{in} = F_y + F_d,$$

або

$$m \left[\frac{d^2 y}{dt^2} \right] = -k(y-x) - r \left[\frac{d(y-x)}{dt} \right]. \quad (2)$$

Перетворимо рівняння (2) до виду:

$$\frac{md^2z}{dt^2} + \frac{rdz}{dt} + kz = -\frac{md^2x}{dt^2}, \quad (3)$$

$$z = y - x.$$

Величина z є зміщення сейсмичної маси щодо корпусу датчика, а x – зміщення корпусу датчика щодо абсолютної системи відліку.

Нехай віброзміщення x змінюється за гармонічним законом, тоді:

$$\frac{d^2}{dt^2} \rightarrow -\omega^2,$$

$$\frac{d}{dt} \rightarrow j\omega,$$

та

$$-\omega^2 z(t) + (r/m)j\omega z(t) = \omega^2 x(t),$$

Якщо в останньому рівнянні виконуються умови $\frac{k}{m} \ll \omega^2$; $\frac{r}{m} \ll \omega$, то $z(t) \cong x(t)$. Останнє означає, що ЧЕ працює у режимі віброметра, тобто відстежує величину віброзміщення.

Якщо ж $\frac{r}{m} \gg \omega$ і $\frac{r}{m} \gg \frac{k}{m}$, то $(\frac{r}{m})z(t) \cong -j\omega x(t)$ і ЧЕ працює в режимі велосиметра, тобто величина $z(t)$ виявляється пропорційною віброшвидкості.

Якщо $\frac{k}{m} \gg \omega^2$ і $\frac{r}{m} \gg \omega^2$, це режим роботи віброакселерометра.

Кожен із розглянутих режимів може бути реалізований вибором відповідних характеристик ЧЕ: m , k , r та діапазону робочих частот. Так для віброметра важливо забезпечити малі відношення $\frac{k}{m}$ і $\frac{r}{m}$, оскільки він працює в зарезонансній області частот. Для велосиметра необхідно використовувати глибоке демпфування, а для акселерометра – перетворювач з великою жорсткістю. У режимі акселерометра, як впливає з вищевикладеного, $r \ll \frac{k}{\omega}$ для $\omega \ll \omega_0$, ω_0 – частота власних коливань датчика.

Так як у віброметрії в основному використовуються акселерометри, проаналізуємо їх роботу більш докладно. Для цього замінімо оригінали у рівнянні (3) їх зображеннями:

$$z(t) = Z(p); x(t) = X(p), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} = p,$$

$$\frac{d^2}{dt^2} = p^2,$$

де p – оператор Лапласа, $T = \sqrt{\frac{m}{k}}$ – період кутової власної частоти датчика, $\eta = 2\xi T$ – коефіцієнт демпфування. Тоді рівняння (4) можна подати у такому вигляді:

$$(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)Z(p) = -p^2 X(p) T^2$$

або

$$W_1(p) = \frac{Z(p)}{p^2} X(p) = \frac{T^2}{(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)}$$

Цей вираз є передатною функцією ЧЕ по прискоренню, оскільки

$$a(p) = p^2 X(p) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2}.$$

Амплитудно-частотна $A(\omega)$ і фазо-частотна $\psi(\omega)$ характеристики можуть бути отримані заміною p на $j\omega$ в передавальній функції ЧЕ і визначенням модуля і аргументу комплексного частотного спектра $W(j\omega)$ відповідно:

$$A(\omega) = W(j\omega), \quad (5)$$

$$\psi(\omega) = \arctg [W(j\omega)]. \quad (6)$$

Виконавши вказані перетворення, отримуємо

$$A(\omega) = T^2 / \sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + 4\xi^2 T^2 \omega^2}, \quad (7)$$

$$\psi(\omega) = -\arctg [2\xi T \omega / (1 - T^2 \omega^2)]. \quad (8)$$

Якщо задана допустима величина динамічної похибки δ_d , яка визначається як

$$\delta_d = [A(\omega_h) - A(0)] / A(0),$$

то гранична частота ω_h робочого діапазону знаходиться з умови

$$1 / \sqrt{[(1 - T^2 \omega_h^2)^2 + 4\xi^2 T^2 \omega_h^2]} - 1 = \delta_d.$$

Частота ω_0 , на якій має місце резонанс системи "чутливий елемент-перетворювач" називається резонансною і визначається за формулою

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (9)$$

Для розширення діапазону робочих частот необхідно, як слід (9), зменшити сейсмичну масу m або збільшити жорсткість її кріплення. Однак при цьому зменшується чутливість датчика в цілому, оскільки вона пропорційна величині T^2 . Тому високочастотні датчики менш чутливі.

Важливою характеристикою ЧЕ є його імпульсна перехідна характеристика, що визначається як зворотне перетворення Лапласа від функції $W(p)$:

$$K(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\omega}^{c+j\omega} W(p) e^{pt} dp, \quad (10)$$

де $K(t)$ – імпульсна функція; c – абсциса абсолютної збіжності.

У свою чергу $W(p)$ може бути виражена через імпульсну перехідну функцію $K(t)$ шляхом застосування до останньої прямого перетворення Лапласа:

$$W(p) = \int_0^{n \rightarrow \infty} K(t) e^{-pt} dt$$

Підставивши функцію $W(p)$, в формулу (10) отримуємо

$$K(t) = - \left[\frac{T}{\sqrt{1-\xi^2}} \right] e^{-\frac{\xi t}{T}} \sin \left[\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \right) t \right] \quad (11)$$

Відомо, що імпульсна перехідна функція є реакцією системи на дельта вплив Дірака, тобто імпульс нескінченно малої тривалості та нескінченно великої амплі-

туди, інтегральний параметр якого дорівнює одиниці. Якщо на вхід системи діє неперіодичний сигнал, то у загальному випадку функція відгуку $y(t)$ визначається інтегралом Дюамеля:

$$y(t) = \int_{n \rightarrow \infty}^t x(\tau) K(t-\tau) d\tau, \quad (12)$$

де $x(\tau)$ – функція вхідного впливу.

Якщо ж $x(\tau)$ являє собою імпульсний сигнал кінцевої тривалості і амплітуди, то при малій тривалості цього імпульсу в порівнянні з періодом циклічної резонансної частоти справедлива формула

$$y(t) = S_0 K(t), \quad (13)$$

$$S_0 = \int_0^{t_n} x(\tau) d\tau_i$$

де τ_i – тривалість імпульсу.

Отримані результати

Розроблена системи моніторингу віброакустичних параметрів деталей, де основними функціями є: постійне вимірювання параметрів шуму та вібрації, аналіз вимірних параметрів, сигналізація про перевищення дозволеного діапазону вимірювальних параметрів, відображення вимірюваних даних в децибелах.

На основі проведеного огляду і аналізу технічних рішень, основних функцій системи була запропонована структурна схема системи, яка показана на рисунку 1.

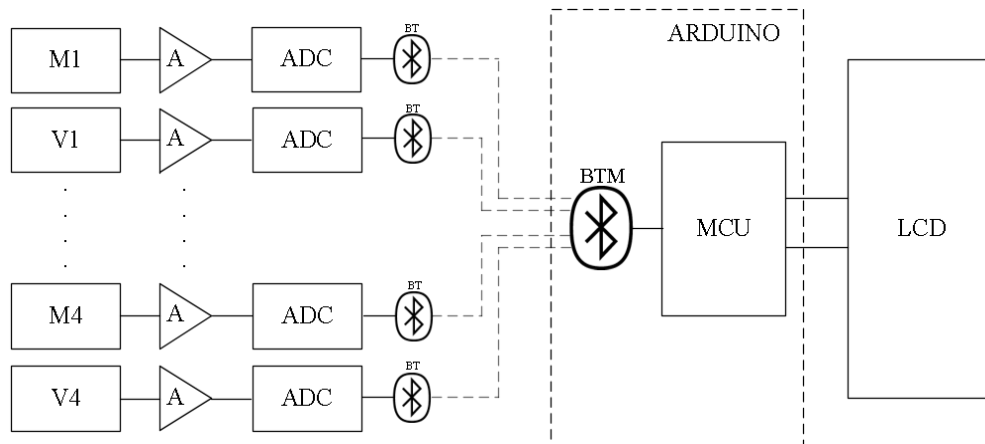


Рис. 1. Структурна схема системи МВП

На схемі позначено:
 • M1...M4 – мікрофони (датчики шуму);

- V1...V4 – акселерометри (датчики вібрації);
- A – підсилювач (amplifier);
- MCU – мікроконтролер;

- BTM – Bluetooth модуль для прийняття сигналу на головній платі від вимірювальних каналів;
- BT – Bluetooth модуль під'єднаний до датчика для передачі сигналу на головну плату;
- LCD – модуль для відображення результату.

З рисунку 1 видно, що система має 8 вимірювальних каналів – 4 для вимірювання вібрації та 4 для вимірювання шуму. Кожен вимірювальний канал складається з самого датчику (M1-M4 – мікрофон для вимірювання шуму, V1-V4 – акселерометр для вібрацій). Отримані дані з датчиків підсилюються за допомогою операційного підсилювача А, таких підсилювачів 8, для кожного з вимірювальних каналів. Після підсилення аналоговий сигнал перетворюється в дискретний код за допомогою одноканального АЦП. Цифровий сигнал після АЦП передається до головної плати з мікроконтролером. Плата приймає дані з усіх 8 вимірювальних каналів. Складаючи значення, отримані з датчиків, головна плата за допомогою програмної обробки аналізує дані, та передає їх на LCD дисплей, який в свою чергу відображає їх.

В системі пропонуємо використати плату «Arduino UNO». Плата ARDUINO має 8 вхідних каналів, що дозволить нам обробити, проаналізувати, та передати дані, а ми в свою чергу будемо використовувати 4 канали для вимірювання шуму та 4 канали для вібрації. Використання багатоканальності під час вимірювання дозволить підвищити точність отриманих даних. Оскільки плата має «Flash-пам'ять», то ми будемо її використовувати як сховище даних, за заданий проміжок, що дозволить нам робити аналіз вимірюваних даних за заданий проміжок часу.

Параметри шуму вимірюються завдяки датчику (мікрофону), потім аналоговий сигнал поступає на підсилювач. Ці два елементи, датчик та підсилювач знаходяться на платі SFM. Потім підсилений аналоговий сигнал поступає на одноканальний АЦП (MCP3421), де перетворю-

ється в дискретний код і може бути підсилений за потреби в 2, 4 або 8 разів. Після цього дискретизований сигнал поступає на Bluetooth модуль, після чого передається на такий самий Bluetooth модуль, але вже під'єднаний до головної плати ARDUINO.

Так само для кожного каналу Параметри вібрації вимірюються завдяки трьохосьовому акселерометру (датчику), потім вимірюваний аналоговий сигнал підсилюються. Так само, як і для вимірювання параметрів шуму, датчик та підсилювач знаходяться на одній платі – SW420. Після цього сигнал перетворюється в цифровий код за допомогою такого ж самого АЦП (MCP3421) і передається на головну плату ARDUINO за допомогою такого ж Bluetooth модуля, як і для параметрів шуму.

На самій платі в мікроконтролері міститься калібрувальна характеристика за допомогою якої проводиться аналіз отриманих вимірювальних сигналів і після цього оброблені дані виводяться на LCD дисплей.

В системі моніторингу віброакустичних параметрів передача даних від датчиків до плати обробки буде здійснюватись за допомогою Bluetooth модуля. До кожного вимірювального каналу буде під'єднаний Bluetooth модуль для передачі підсилених та дискретизованих даних на плату. До плати також буде під'єднаний такий модуль для прийняття сигналу від вимірювальних каналів.

Вимірювальні канали спроектованої системи передають виміряні дані за допомогою бездротового з'єднання, що спрощує використання та розміщення їх в будь-яких місцях та дозволяє охоплювати більшу площу вимірюваної зони. Аналоги ж являють собою переносні прилади, які вимірюють певні малі площини.

Щодо принципів роботи, не дивлячись на велику кількість приладів, принцип їх роботи залишається не змінними. Принцип вимірювання параметрів шуму заснований на прийнятті акустичних хвиль з подальшим перетворенням їх енергії за допомогою найрізноматніших технологій

в електричний потенціал, який прямо пропорційний величині сигналу. Щодо принципу вимірювання параметрів вібрації, то використовуються вібродатчики, що сприймають механічні коливання, які також за допомогою різноманітних технологій перетворюють до відповідного електричного потенціалу.

Система призначена для вимірювання, моніторингу та індикації віброакустичних параметрів деталей. Система моніторингу віброакустичних параметрів виконує такі функції:

- вимірювання параметрів шуму та вібрації;
- аналіз вимірюваних даних;
- перевірка на перевищення дозвального діапазону роботи;
- індикація вимірюваних даних;
- сигналізація при перевищенні дозвального діапазону роботи.

Оскільки вимірювальні дані, які надходять від датчиків не дискретизовані, то в нашій системі передбачено дискретизування цих даних за допомогою АЦП. Для нормального відображення вимірюваного сигналу на LCD дисплеї проводиться калібрування, тому знайдена раніше калібрувальна характеристика буде заноситися на головну плату ARDUINO. Також, як налаштування системи є можливість задання часу опитування датчиків, тобто з яким інтервалом будуть прийматися вимірювані дані з вимірювальних каналів на головну плату.

Так, як і калібрувальні характеристики, в головну плату, а саме в мікроконтролер будуть заноситися максимальні значення діапазонів для параметрів шуму і вібрації, для аналізу отриманих вимірювальних даних.

Після аналізу, в залежності від результату буде виконуватися сигналізація про перевищення діапазону, якщо таке відбудеться. Далі дані будуть заноситися до flash пам'яті мікроконтролеру. Останнім кроком є індикація вимірюваних даних на LCD-дисплеї.

Висновки

Вирішуючи завдання ідентифікації дефектів літальних апаратів за спричиненими ними змінами динамічних характеристик об'єктів контролю в роботі була запропонована система моніторингу віброакустичних параметрів, яка виконує наступні функції: вимірювання віброакустичних параметрів (параметри вібрації та шуму); аналіз вимірюваних значень віброакустичних параметрів; сигналізація користувача про перевищення дозвального діапазону параметрів вібрації та шуму; збереження вимірюваних даних за заданий проміжок години; відображення вимірюваних даних.

Використання розробленої системи моніторингу віброакустичних параметрів дозволить виявити такі види дефектів, як порушення цілісності конструкцій, ослаблення кріплень та поява зазорів у місцях стикування агрегатів, люфти в механічних системах передачі зусиль або переміщень, підвищене сухе тертя в опорах поверхонь, що відхиляються, резонансні режими коливань елементів планера і систем, недостатня ефективність гідравлічних демпферів у складі пружного планера.

Розроблена система має ряд переваг, завдяки вибраним технічним рішенням, а саме було обрано датчик для вимірювання віброакустичних параметрів, який задовольняє потреби для поставленої задачі та має наступні переваги: великий діапазон вимірювання, малий рівень шуму, діапазон частот сигналу, відношення сигнал/шум. Використання АЦП у системі дозволяє програмно обрати частоту дискретизації сигналу. Також перевагою системи є використання Bluetooth модуля, який має велику дальність прийняття сигналу, що дозволить нам розміщувати вимірювальні канали в будь-якому потрібному місці, також плата має великий рівень захисту даних. Вимірювальні канали розробленої системи передають вимірювані дані за допомогою бездротового з'єднання, що спрощує використання та розміщення їх у будь-яких місцях об'єкта контролю та дозволяє

охоплювати більшу площу вимірюваної зони.

Література

1. *Tomaszek H., Stępień S., Ważny M.* Aircraft flight safety with the risk of failure during performance of an aviation task // Tribology• Reliability• Terotechnology Diagnostics• Safety• Eco-Engineering Tribologia• Niezawodność• Eksploatyka Diagnostyka• Bezpieczeństwo• Ekoinżynieria. – 2010. – 75 с.
2. *Advanced Avionics Handbook.* – U.S. Department of Transportation, FAA, 2009. – 112 p.
3. *Berns V., Zhukov E.* Diagnostics of airframes defects by vibration tests results // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Т. 2125. – №. 1. – С. 030089.
4. *Abdulameer H.A., Wasmi H.R.* Vibration control analysis of aircraft wing by using smart material // Innovative Systems Design and Engineering. – 2015. – Т. 6. – №. 8. – С. 7-42.
5. *Мотылев Н.И.* Выявление механических дефектов в элементах реакторов и конструкций АЭС при тестовых виброударных воздействиях // Технологии и системы обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – СПб.: Менделеев, 2004. – №. 2. – С. 126-131.
6. *Постнов В.А.* Определение повреждений упругих систем путем математической обработки частотных спектров, полученных из эксперимента // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2000. – №. 6. – С. 155-160.
7. *Danek O.A.* contribution to fault vibration diagnosis of structures and machines // Stroj. cas. – 1992. – Т. 43. – №. 1. – С. 13-19.
8. *Perera R., Fang S.E., Huerta C.* Structural crack detection without updated baseline model by single and multiobjective optimization // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – Т. 23. – №. 3. – С. 752-768.
9. *Stakhova A., Kvasnikov V.* Development of a device for measuring and analyzing vibrations // Informatyka, Automatyka, Pomiarzy w Gospodarce i Ochronie Środowiska. – 2021. – Т. 11. – №. 2. – С. 48-51.
10. *Da Silva R.R. et al.* Fault diagnosis in rotating machine using full spectrum of vibration and fuzzy logic // Journal of Engineering Science and Technology. – 2017. – Т. 12. – №. 11. – С. 2952-2964.
11. *Jarmolowicz M., Kornatowski E.* Method of vibroacoustic signal spectrum optimization in diagnostics of devices // 2017 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). – IEEE, 2017. – С. 1-5.
12. *Fatima S., Mohanty A.R., Kazmi H.F.* Fault classification and detection in a rotor bearing rig // Journal of Vibration Engineering & Technologies. – 2016. – Т. 4. – №. 6. – С. 491-498.
13. *Guo L., Chen J., Li X.* Rolling bearing fault classification based on envelope spectrum and support vector machine // Journal of Vibration and Control. – 2009. – Т. 15. – №. 9. – С. 1349-1363.
14. *Varanis M. et al.* MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: A comprehensive review with applications // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2018. – Т. 40. – №. 11. – С. 1-18.
15. *Iwaniec M. et al.* Development of vibration spectrum analyzer using the Raspberry Pi microcomputer and 3-axis digital MEMS accelerometer ADXL345 // 2017 XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). – IEEE, 2017. – С. 25-29.
16. *Faisal I. A., Purboyo T. W., Ansori A.S.R.* A review of accelerometer sensor and gyroscope sensor in IMU sensors on motion capture // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – Т. 15. – №. 3. – С. 826-829.
17. *Arnau A. et al.* Piezoelectric transducers and applications. – Berlin: Springer, 2004. – Т. 2004.
18. *Rupitsch S.J.* Piezoelectric sensors and actuators: Fundamentals and applications. – Springer, 2018.

Стахова А.П., Парашанов В.Г.

ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВІБРОМОНІТОРИНГУ СТАНУ АВІАДЕТАЛЕЙ

У статті розглядаються проблеми безпеки використання авіаційної техніки, пов'язані з впливом експлуатаційної вібрації літальних апаратів. Аналізується актуальне питання своєчасного виявлення та попередження небезпечного стану відповідальних машин та механізмів. Розглядаються сучасні засоби вимірювання параметрів вібрації, принципи вимірювання, а також характеристики чутливого елемента вимірювального перетворювача. Представлено структурну схему запропонованої системи моніторингу віброакустичних параметрів, яка побудована на основі п'єзоелектричного перетворювача. Дана система може вимірювати параметри шуму та вібрації та аналізувати виміряні дані, сигналізувати про перевищення допустимих діапазонів, відображати виміряні дані. Перевага запропонованої системи, це зв'язок вимірювальних каналів з основною платою за допомогою модуля Bluetooth, що дозволяє розміщувати датчики для вимірювання шуму та вібрації будь-якої частини.

Ключові слова: вібрація, система вимірювання, датчики вібрації, моніторинг стану, деталь літака.

Stakhova A.P., Parashchanov V.G.

REMOTE CONTROL OF VIBRO MONITORING SYSTEM OF AIRCRAFT PARTS

This article discusses the safety problems of the use of aviation technology associated with the influence of operational vibration of aircraft. The topical issue of timely detection and prevention of a dangerous state of critical machines and mechanisms is analyzed. Modern means of measuring vibration parameters, principles of measurement, as well as characteristics of the sensitive element of the measuring transducer are considered. The block diagram of the proposed system for monitoring vibroacoustic parameters, which is built on the basis of a piezoelectric transducer, are presented. This system can measure the parameters of noise and vibration and analyze the measured data, signal the exceeding of permissible ranges, display the measured data. The advantage of the proposed system is the connection of the measuring channels with the main board using the Bluetooth module, which allows the sensors to measure noise and vibration to be placed in any part.

Keywords: vibration, measurement system, vibration sensors, condition monitoring, aircraft part.