Semenets, V. V., & Prasol, I. V. (2024). Software and hardware microcontroller complex for vibration monitoring. *Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal, 31*, 65-75. Ostrava: Tuculart Edition, European Institute for Innovation Development. (In Ukrainian)

DOI: 10.47451/inn2024-05-03

The paper is published in Crossref, ICI Copernicus, BASE, Zenodo, OpenAIRE, LORY, Academic Resource Index ResearchBib, J-Gate, ISI International Scientific Indexing, ADL, JournalsPedia, Scilit, EBSCO, Mendeley, and WebArchive databases.

***Valerii V. Semenets***, Doctor of Technical Sciences, Department Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics. Kharkiv, Ukraine.
ORCID 0000-0001-8969-2143, Scopus 25929592700
***Igor V. Prasol***, Doctor of Technical Sciences, Department Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics. Kharkiv, Ukraine.
ORCID 0000-0003-2537-7376, Scopus 55891027200

## Software and hardware microcontroller complex for vibration monitoring

*Abstract:* Modern technological processes require continuous monitoring of many parameters of technological equipment. Mechanical parameters are the most important ones, in particular, mechanical vibrations of the object under study. Such monitoring is required in various fields of science and technology. The purpose of the study is to build a microcontroller-based system that allows analyzing vibration parameters of a technical object to prevent possible accidents. The formulation of the problem of constructing a hardware and software complex based on the STM32F407VG microcontroller for studying vibrations with the LIS3DSH accelerometer is presented. A physical model of the system, including a microcontroller and a three-axis digital accelerometer LIS3DSH, has been designed and implemented. The system is characterized by a low price of the technical solution. The interaction between the microcontroller and the accelerometer occurs via the SPI interface. Specialized software for the system has been developed and implemented, including a driver for setting up, collecting, and processing data from the accelerometer and corresponding software for plotting vibration acceleration graphs of signals in the time and frequency domains. The built-in software makes it possible to implement a wide range of functionality and freely use it. The constructed system makes it possible to analyze vibration parameters to anticipate and prevent possible accidents, reducing costs associated with the failure of expensive parts and components.

*Keywords:* software and hardware complex, vibrations, accelerometer, software, register, interface, microcontroller.

***Валерій Семенець***, доктор технічних наук, професор кафедри, кафедра біомедичної інженерії, Харківський національний інститут радіоелектроніки. Харків, Україна.
ORCID 0000-0001-8969-2143, Scopus 25929592700
***Ігор Прасол***, доктор технічних наук, професор кафедри, кафедра біомедичної інженерії, Харківський національний інститут радіоелектроніки. Харків, Україна.
ORCID 0000-0003-2537-7376, Scopus 55891027200

## Програмно-апаратний комплекс на базі мікроконтролера для дослідження вібрацій

*Анотація:* Сучасні технологічні процеси вимагають постійного контролю багатьох параметрів технологічного обладнання. Найбільш важливими є механічні параметри, зокрема, механічні коливання досліджуваного об'єкта. Такий моніторинг необхідний в різних областях науки і техніки. Метою роботи є побудова системи на базі мікроконтролера, яка дає можливість проводити аналіз параметрів вібрації технічного об'єкта для запобігання можливих аварій. Приведена постановка задачі побудови програмно-апаратного комплексу на базі мікроконтролера STM32F407VG для дослідження вібрацій акселерометром LIS3DSH. Спроектовано та реалізовано фізичну модель системи, яка включає мікроконтролер, трьохосьовий цифровий акселерометр LIS3DSH. Система характеризується низькою ціною технічного рішення. Взаємодія між мікроконтролером та акселерометром відбувається через інтерфейс SPI. Розроблено та реалізовано спеціалізоване програмне забезпечення системи, яке включає драйвер для налаштування, збору і опрацювання даних з акселерометра та відповідне програмне забезпечення для побудови графіків сигналів віброприскорення в часовій і частотній областях. Побудоване програмне забезпечення дає змогу реалізувати широкі функціональні можливості та є вільним для використовування. Побудована система дає можливість проводити аналіз параметрів вібрації з метою передбачення і запобігання можливих аварій, зменшуючи затрати пов'язані з виходом із ладу дорогих деталей і вузлів.

*Ключові слова*: програмно-апаратний комплекс, вібрації, акселерометр, програмне забезпечення, регістр, інтерфейс, мікроконтролер.

## Вступ

Сучасні технологічні процеси потребують безперервного контролю за багатьма параметрами технологічного обладнання. Одними з найважливіших є механічні параметри, зокрема механічні вібрації досліджуваного об'єкта.

Подібний контроль необхідно в різних областях науки та техніки. Наприклад, в напівпровідниковій електроніці – для контролю вібрації установок вирощування кристалів, а в мікроелектроніці – для контролю вібрацій установок фотолітографії. В машинобудуванні такий контроль використовується для визначення вібрацій верстатів, а в автомобільній промисловості – щоб контролювати вібрації окремих вузлів і автомобіля в цілому. На залізничному транспорті контролюють вібрації, щоб визначити наближення поїзда, в енергетиці – для контролю вібрації лопаток газових турбін та контролю вібрацій в газопроводах, а в авіабудуванні – щоб контролювати політ і т.п.

Отже, розробка систем призначених для моніторингу та аналізу вібрацій технічних об'єктів є актуальним питанням сьогодення.

## Результати дослідження

### Аналіз літературних джерел та постановка проблеми вібраційної діагностики обладнання

Розробленню систем моніторингу та аналізу вібрацій присвячено різні науково-технічні статті. Зокрема, в роботі Rață розроблено систему моніторингу та аналізу вібрацій, що виникають в електромоторах (*Rață & Rață, 2014*). Система використовує

п'єзоелектричний акселерометр (ICP 603C11) і плату збору даних від National Instruments (NI 6009). Вібраційні сигнали збираються з різних частин електричних моторів і передаються на комп'ютер через плату збору даних. Віртуальний інструмент, що дає змогу в реальному часі моніторити і проводити Фур'є аналіз отриманих сигналів з сенсора вібрацій реалізовано в LabVIEW. В роботі M. Milovančević та ін. (*2014*) розроблено вбудовану систему для моніторингу вібрацій насосного агрегату на базі мікроконтролера від компанії Microchip. Програмне забезпечення (ПЗ) для збору і аналізу даних оптимізовано для тестування помп з турбонаддувом з швидкостями обертання до 2000 об/хв. Автори провели велику кількість вимірювань за допомогою розробленої системи на різних турбоагрегатах для визначення експлуатаційних умов насосних агрегатів (*Milovančević, 2014*). В статті S. M. S. Rocha та ін. (*2016*) описано метод визначення переміщення та швидкості з сигналів прискорення отриманих з акселерометрів, а в статті H. Sekiya та ін. (*2016*) розроблено методику моніторингу надійності мостових конструкцій використовуючи MEMC акселерометри. В статті побудовано систему моніторингу верстатів і процесів механічної обробки (*Sekiya et al., 2016*). Система збору вібраційного сигналу базується на мікроконтролері Arduino, який підключено до комп'ютера через USB порт. Спеціальне розроблене ПЗ під LabVIEW зчитує та опрацьовує дані в реальному масштабі часу. В статті Goyal та Pabla (*2016*) досліджено придатність мікро-електромеханічних (MEMC) акселерометрів для моніторингу стану верстатів з ЧПК. Тести проведено на реально-діючому верстаті з ЧПК в типовому промисловому цеху. Показано, що MEMC давачі можуть бути хорошою альтернативою до стандартних сенсорів вібрації, оскільки вони не потребують важких електрометричних підсилювачів. Вибір такого давача має бути зроблений відповідно до вимог застосування і результату тесту на придатність. Ряд авторів використовують мікроконтролери Arduino в апаратно-програмній системі для вимірювання механічних вібрацій (*Albarbar, 2008*). В якості давачів вібрації використано акселерометри ADXL335. Розроблена система використовувалася для дослідження та моніторингу вібрацій вакуумної помпи. Дослідження показали можливість і доцільність розроблення вбудованих систем моніторингу вібрацій в реальному масштабі часу з використанням недорогого апаратного та ПЗ. Використання іншого типу мікроконтролера наведено в роботах (*Hjort & Holmberg, 2015*; *Chaudary et al., 2014*). Зокрема, запропоновано систему моніторингу вібрацій ротаційних машин, верстатів, яка побудована на мікроконтролері PIC-18F6520 і акселерометрі ADXL322. Проведено дослідження на перевірку можливості реєструвати піки частот появи відмов для різних випадків несправностей. Найкращими підходами і технічними рішеннями серед описаних вище для розв'язання розглядуваного кола задач можна віднести методи, які описані в роботах (*Rață & Rață, 2014*; *Rocha et al., 2016*). Методи дослідження ґрунтувалися на проведенні експериментів з різними технічними об'єктами, що включали вимірювання параметрів вібрації, їх обробку та аналіз за допомогою власно розроблених апаратно-програмних систем. Розроблені системи є закритими та мають високу ціну, що не дає змоги розширювати їх функціональні можливості та модифікацію до відповідних потреб експлуатації. Отже, аналіз існуючих підходів та технічних рішень привів до розроблення якісно нової недорогої відкритої апаратно-програмної системи моніторингу вібрацій в реальному масштабі часу (*Semenetz & Leonidov, 2019*; *Леонідов та Семенець, 2019*;

*Leonidov, 2014*; *Семенець та Леонідов, 2023*; *Зубков та ін., 2022*; *Семенець та Леонідов, 2020a*; *Семенець та Леонідов, 2020b*). Така система має бути побудована на доступних і недорогих комплектуючих, відкритому ПЗ та з можливістю модифікації або розширення її функціональних можливостей відповідно до вимог та області застосування.

**Попередні дані**

Виходячи з аналізу, проведеного вище, найбільш підходящим варіантом є використання датчиків MEMS типу. Особливістю таких датчикі є малий розмір корпусу та низька ціна. Більшість таких датчиків підтримують інтерфейс SPI. З найбільш сучасних моделей можливо виділити LIS3DSH, який позиціонуються виробником як спеціалізоване рішення для розробки віброметрів промислового обладнання. LIS3DSH – це датчик руху з цифровим виходом (виготовлений за технологією MEMS).

*Застосування:* Інтерфейс користувача для керуванням рухом, ігри та віртуальна реальність, крокомір, інтелектуальне енергозбереження для портативних пристроїв, орієнтація дисплея, розпізнавання клацання/подвійного клацання, розпізнавання та реєстрація ударів, контроль і компенсація вібрацій.

*Опис.* LIS3DSH – це високопродуктивний трьохосьовий лінійний акселерометр із наднизьким енергоспоживанням, що належить до сімейства «нано» з вбудованим кінцевим автоматом, який можна запрограмувати для реалізації автономних програм. LIS3DSH має повні шкали ±2g/±4g/±6g/±8g/±16g і він здатний вимірювати прискорення зі швидкістю вихідних даних від 3,125 Гц до 1,6 КГц. Можливість самоперевірки дозволяє користувачеві перевірити роботу датчика в кінцевому застосуванні.

Пристрій можна налаштувати для генерування сигналів переривання, активованих шаблонами руху, визначеними користувачем.

LIS3DSH має інтегрований буфер – «першим увійшов, першим вийшов» (FIFO), що дозволяє користувачеві зберігати дані для зменшення втручання головного процесора. LIS3DSH доступний у невеликому тонкому пластиковому корпусі (LGA), і він гарантовано працює в розширеному діапазоні температур від –40°C до +85°C.

*Чутливість.* Чутливість може бути визначена, наприклад, прикладаючи до нього прискорення 1g. Оскільки датчик може вимірювати прискорення постійного струму, це можна легко зробити, направивши вісь інтересу до центру землі, відзначивши вихідне значення, повернувши датчик на 180° (вказуючи на небо) і знову запам'ятавши вихідне значення. При цьому до датчика прикладається прискорення ±1g. Віднімання більшого вихідного значення від меншого та ділення результату на 2 призводить до фактичної чутливості датчика. Це значення дуже мало змінюється з температурою, а також з часом.

*Нульовий рівень перевантаження.* Зсув рівня нульової перевантаження (TyOff) описує відхилення фактичного вихідного сигналу від ідеального вихідного сигналу за відсутності прискорення. Датчик у стаціонарному стані на горизонтальній поверхні вимірює 0 g по осі X і 0 g по осі Y, тоді як вісь Z має 1 g. Вихідний сигнал ідеально знаходиться в середині динамічного діапазону датчика (вміст регістрів OUT 00h, дані виражені як доповнення до 2). Відхилення від ідеального значення в цьому випадку називається нульовим зсувом. Зміщення певною мірою є результатом навантаження на датчик MEMS, тому зміщення

може дещо змінитися після встановлення датчика на друковану плату. Зсув незначно змінюється в залежності від температури.

*Самоперевірка.* Самоперевірка дозволяє перевірити працездатність датчика, не переміщаючи його. Функція само тестування вимкнена, коли біт само тестування (ST) запрограмований на «0». Коли біт самотестування запрограмований на «1», до датчика прикладається сила приведення в дію, імітуючи певне прискорення вхідного сигналу. У цьому випадку вихідні сигнали датчика демонструють зміну своїх рівнів постійного струму. Коли самотестування активовано, вихідний рівень пристрою визначається алгебраїчною сумою сигналів, створених прискоренням, що діє на датчик, і електростатичною випробувальною силою.

*Чутливий елемент.* MEMS технологія використовується для створення поверхневого акселерометра. Технологія дозволяє створювати підвішені кремнієві структури, які прикріплені до підкладки в кількох точках, які називаються якорями, і можуть вільно рухатися в напрямку вимірюваного прискорення.

Коли до датчика прикладається прискорення, пробна маса зміщується зі свого номінального положення, викликаючи дисбаланс у ємнісному напівмосту. Цей дисбаланс вимірюється за допомогою інтегрування заряду у відповідь на імпульс напруги, прикладений до конденсатора.

У стаціонарному режимі номінальне значення конденсаторів становить кілька пФ. Повний ланцюг вимірювань складається з малошумного ємнісного підсилювача, який перетворює ємнісний дисбаланс датчика MEMS в аналогову напругу, яка врешті стає доступною для користувача через аналого-цифровий перетворювач.

Доступ до даних прискорення можна отримати через інтерфейс $I^2$C/SPI, що робить пристрій особливо придатним для прямої взаємодії з мікроконтролером.

*Цифрові магістральні блоки LIS3DSH.* LIS3DSH містить два кінцевих автомати, здатні запускати визначену користувачем програму.

Програма складається з набору інструкцій, які визначають перехід до послідовних станів. Можливі умовні розгалуження.

З кожного стану (n) можливий перехід до наступного стану (n+1) або скидання стану. Перехід до точки скидання відбувається, коли «умова скидання» виконується; Перехід до наступного кроку відбувається, коли виконується «НАСТУПНА умова».

Кожен кінцевий автомат дозволяє реалізувати розпізнавання різних станів: вільне падіння, пробудження, 4D/6D орієнтація, лічильник пульсу та розпізнавання кроків, клацання/подвійне клацання, струшування/подвійне струшування, обличчям догори/обличчям вниз, поворот/подвійний поворот.

*FIFO.* В LIS3DSH вбудоване FIFO даних прискорення для кожного з трьох вихідних каналів, X, Y і Z. Це забезпечує стабільне енергозбереження системи, оскільки головному процесору не потрібно постійно опитувати дані від датчика, але він може вийти з режиму сну лише за потреби видаляти важливі дані з FIFO. Цей буфер може працювати у чотирьох різних режимах: режим обходу, режим FIFO, режим потоку та режим потоку до FIFO. Кожен режим вибирається бітами FIFO_MODE.

*Отримати дані з FIFO.* Дані FIFO зчитуються через регістри OUT_X, OUT_Y і OUT_Z. Коли FIFO знаходиться в режимі Stream, Trigger або FIFO, операція читання

регістрів OUT_X, OUT_Y або OUT_Z надає дані, що зберігаються в FIFO. Кожного разу, коли дані зчитуються з FIFO, дані X, Y і Z поміщаються в регістри OUT_X, OUT_Y і OUT_Z, і можна використовувати операції як одного читання, так і операції read_burst.

*Цифрові інтерфейси.* Доступ до регістрів, вбудованих у LIS3DSH, можна отримати як через послідовний інтерфейс $I^2$C, так і через SPI. Останнє програмне забезпечення може бути налаштоване для роботи в режимі 3- або 4-провідного інтерфейсу.

Послідовні інтерфейси відображаються на ті самі контакти. Щоб вибрати/використовувати інтерфейс $I^2$C, лінія CS повинна бути підключена до високого рівня (тобто підключена до Vdd_IO).

*Послідовний інтерфейс $I^2C$.* В LIS3DSH $I^2$C використовується для запису даних у регістри, вміст яких також можна прочитати.

Є два сигнали, пов'язані з шиною $I^2$C: послідовна лінія синхронізації (SCL) і послідовна лінія даних (SDA). Остання є дво направленою лінією, яка використовується для надсилання та отримання даних до/з інтерфейсу. Обидві лінії повинні бути підключені до Vdd_IO через зовнішній підтягуючий резистор. Коли інтерфейс вільний, обидві лінії мають високий рівень. Інтерфейс $I^2$C сумісний зі стандартами швидкого режиму (400 кГц) $I^2$C, а також із звичайним режимом.

*Робота $I^2C$.* Транзакція на шині починається через сигнал запуску (ST). Початкова умова визначається як перехід HIGH на LOW на лінії даних, у той час як лінія SCL утримується HIGH. Після того, як це було передано головним приладом, інтерфейс вважається зайнятим. Наступний байт даних, переданий після умови запуску, містить адресу підлеглого пристрою в перших 7 бітах, а восьмий біт повідомляє, чи головний пристрій отримує дані від підлеглого пристрою чи передає дані підлеглому. Коли надсилається адреса, кожен пристрій у системі порівнює перші сім бітів після умови запуску зі своєю адресую. Якщо вони збігаються, пристрій вважає себе адресованим головним пристроєм.

Підпорядкована адреса (SAD), пов’язана з LIS3DSH, дорівнює 00111xxb, тоді як біти xx модифікуються виводом SEL/SDO, щоб змінити адресу пристрою. Якщо контакт SEL підключено до джерела напруги – адреса 0011101b (інакше адреса 0011110b, якщо контакт SEL підключено до землі). Це рішення дозволяє підключати та адресувати два різні акселерометри до тих самих ліній $I^2$C.

Передача даних із підтвердженням є обов’язковою. Передавач повинен звільнити лінію SDA під час імпульсу підтвердження. Потім приймач повинен підтягнути лінію даних LOW, щоб вона залишалася стабільно низькою протягом періоду HIGH тактового імпульсу підтвердження. Одержувач, якому було адресовано, зобов'язаний генерувати підтвердження після кожного байту отриманих даних.

$I^2$C, вбудований у LIS3DSH, працює як підлеглий пристрій, тому слід дотримуватися наступного протоколу. Після виконання умови запуску (ST) надсилається адреса підлеглого пристрою, після повернення підтвердження підлеглого пристрою (SAK) передається 8-бітна під адреса (SUB): 7 LSb представляє фактичну адресу регістра, а біт ADD_INC (CTRL_REG6) визначає приріст адреси.

Підлегла адреса доповнюється бітом читання/запису. Якщо біт дорівнює «1» (читання), умова повторного запуску (SR) повинна бути видана після двох байтів під адреси; якщо біт дорівнює «0» (запис), головний передає на підлеглий без зміни напрямку.

Дані передаються в байтовому форматі (DATA). Кожна передача даних містить 8 біт. Кількість байтів, що передаються за одну передачу, необмежена. Дані передаються спочатку зі старшим бітом (MSb). Якщо приймач не може отримати ще один повний байт даних, доки він не виконає якусь іншу функцію, то він може утримувати лінію синхронізації, SCL LOW, щоб змусити передавач перейти в стан очікування. Передача даних продовжується лише тоді, коли приймач готовий отримати ще один байт і звільнить лінію даних. Якщо підлеглий приймач не визнає адресу підлеглого (тобто він не може отримати, оскільки виконує певну функцію в режимі реального часу), підлеглий пристрій повинен залишити лінію даних ВИСОКИЙ. Тоді майстер може перервати передачу. Перехід від LOW до HIGH на лінії SDA, коли лінія SCL є HIGH, визначається як умова STOP. Кожна передача даних повинна бути припинена генерацією умови STOP (SP). У представленому форматі зв'язку MAK – підтвердження головного, а NMAK – підтвердження без головного.

*Інтерфейс шини SPI.* LIS3DSH SPI є веденою шиною. SPI дозволяє записувати та читати регістри пристрою. Послідовний інтерфейс взаємодіє із зовнішнім світом за допомогою 4 виводів: CS ,SPC, SDI та SDO.

CS – це активація послідовного порту, і вона контролюється головним SPI. Він знижується на початку передачі і повертається до високого в кінці. SPC – це таймер послідовного порту, і ним керує головний пристрій SPI. Він зупиняється на високому рівні, коли CS є високим (немає передачі). SDI та SDO є відповідно вхідними та вихідними даними послідовного порту. Ці лінії проходять на спадаючому фронті SPC і повинні бути захоплені на наростаючому фронті SPC.

І команди регістру читання, і регістру запису виконуються за 16 тактових імпульсів або кратні 8 у разі читання/запису кількох байтів. Тривалість біта – це час між двома спадаючими фронтами SPC. Перший біт (біт 0) починається з першого спадаючого фронту SPC після спадаючого фронту CS, тоді як останній біт (біт 15, біт 23, ...) починається з останнього спадаючого фронту SPC безпосередньо перед наростаючим фронтом CS.

Біт 0: біт RW. Коли 0, дані DI(7:0) записуються в пристрій. Коли 1, дані DO(7:0) з пристрою зчитуються. В останньому випадку чіп керує SDO на початку біта 8.

Біт 1-7: адреса AD(6:0). Це поле адреси індексованого регістру.

Біт 8-15: дані DI(7:0) (режим запису). Це дані, які записуються на пристрій (спочатку MSb).

Біт 8-15: дані DO(7:0) (режим читання). Це дані, які зчитуються з пристрою (спочатку MSb).

У кількох командах читання/запису додаються додаткові блоки з 8 тактових періодів. Коли біт ADD_INC(CTRL_REG6) дорівнює «0», адреса, яка використовується для читання/запису даних, залишається незмінною для кожного блоку. Коли біт ADD_INC дорівнює «1», адреса, яка використовується для читання/запису даних, збільшується в кожному блоці.

Функції та поведінка SDI та SDO залишаються незмінними.

## Отримані результати

Апаратне забезпечення системи побудовано на МК STM32F407VG і трьохосьовому цифровому акселерометрі LIS3DSH. Акселерометр встановлюється на об'єкті моніторингу і підключається по шині SPI до МК. Мікроконтролер збирає дані з давача та їх опрацьовує. Акселерометр використано як давач для вимірювання вібрацій. LIS3DSH – це мініатюрний трьохосьовий цифровий акселерометр фірми STMicroelectronics з малим енергоспоживанням. LIS3DSH відносять до класу ємнісних акселерометрів. Цей прилад є ідеальний для вимірювання динамічних прискорень, низькочастотних вібрацій, статичних прискорень гравітації, руху і кутів нахилу. Смуга пропускання характеризує здатність давача помічати зміни прискорення, що відбуваються з високою частотою (наприклад, вібрація з частотою 1000 Гц). На цю характеристику впливає частота дискретизації вбудованого АЦП акселерометра, яка повинна бути як мінімум в два рази більше смуги пропускання.

В LIS3DSH максимум виміру – до 16 біт при вимірюванні прискорення ±16 g з постійною чутливістю – 4 mg/LSB у всіх діапазонах вимірювання g. Акселерометр має функції виявлення одиночного та подвійного поштовхів, контролю активності/не активності, функцію виявлення вільного падіння; є можливість гнучкого задання режимів переривання з вибором будь-якого (з 2-х можливих) виводів переривань; зміна діапазону вимірювання, як і смуги пропускання, вибирається подачею відповідної команди. Така вбудована система постійно відслідковує вібрацію, наприклад, працюючого верстату, в режимі реального часу і аналізує параметри вібрації. Система видає попереджувальні повідомлення або зупиняє верстат у випадку виникнення неприпустимих вібрацій – запобігаючи таким чином можливі поломки і аварії. Система також має надавати достатню інформацію користувачу, щоб він зміг розпізнати можливі проблеми і прийняти профілактичні заходи на основі аналізу спектру вібрації характерного для конкретного виробу.

Система в змозі своєчасно попередити про ймовірну несправність, що дає можливість користувачу здійснити своєчасні профілактичні заходи.

## Обговорення

Моніторинг сумарної вібрації має здійснюватися як в часовому, так і в частотному діапазонах. В часовому діапазоні система безперервно відслідковує стан виробу в режимі реального часу, на основі широкосмугового вимірювання віброшвидкостей, віброприскорень і вібропереміщень.

В частотному діапазоні може бути встановлений ряд границь попереджуючих і аварійних сигналів для різних частотних діапазонів. Ці діапазони покривають весь спектр вібрації і дають змогу провести аналіз рівня вібрацій в контрольованій області на предмет перевищення допустимих меж по всьому частотному спектрі.

Розроблений алгоритм функціонування системи включає такі кроки:

Крок 1. Ініціалізація акселерометра LIS3DSH на шині SPI.

Крок 2. Зчитування значення з регістра WHO_AM_I і перевірка номера акселерометра.

Крок 3. Налаштування акселерометра LIS3DSH.

Крок 4. Встановлення значень дискретизації та режиму переривань.

Крок 5. Встановлення діапазону вимірювання та розподільної здатності.

Крок 6. Старт вимірювання.

Крок 7. Запис значень у буфер по перериванню та очікування заповнення буферу .

Крок 8. Після заповнення буферу використання FIFO для переведення ряду у частотне представлення.

Крок 9. Передача за допомогою USB.

Крок 10. Після передачі початок виконування з кроку 6.

Розроблено наступні функції:

- void Accel_Ini(void) – функція ініціалізації датчика;
- static void Error (void) – функція-обробник помилки;
- Accel IO_Read(uintl6_t DeviceAddr. uint8_t RegisterAddr) – функція читання даних за адресами датчика та регістру;
- void Accel_IO_Write(uint16_t DeviceAddr, uint8_t RegisterAddr, uint8_t Value) – функція запису даних за адресами датчика та регістру;
- uint8_t Accel_ReadID(void) – функція читання адреси мікросхеми;
- void Accel_AccFilterConfig(uint8_t FilterStruct) – функція підключення фільтру;
- void AccInit(uintl6_t InitStruct) – функція ініціалізації налаштувань;
- void Accel_GetXYZ(intl6_t* pData) – функція зчитування показників аксельрометра;
- static uint8_t SPIx_WriteRead(uint8_t Byte) – функція для прийому та передачі даних по інтерфейсу SPI;
- AccInit(ctrl) – функцію основної ініціалізації акселерометра.

З DATASHEET отримуємо константи для налаштування системи:

- LIS3DSH_DATARATE_100: значення 0×60: даним значенням ми включимо біти ODR1 та ODR2, тим самим налаштуємо швидкість передачі даних 100 Гц.
- LIS3DSH_XYZ ENABLE: значення 0×07: включимо біти всіх осей, тим самим визначаємо режим роботи датчика, при якому він зчитуватиме дані всіх трьох осей (x, y та z).
- LIS3DSH_SERIALINTERFACE_4WIRE: значення 0×00: цей біт відповідає за включення режиму інтерфейсної шини. Залишаємо 0, тим самим ми включимо 4-провідний SPI.
- LIS3DSH_SELFTEST_NORMAL: значення 0×00: тут ми позначимо, що не включатимемо біти 1 і 2 (ST1 і ST2), тим самим включимо режим само тестування (звичайний режим).
- LIS3DSH_FULLSCALE_2: значення 0×00: біти FSCALE ми також не включаємо, тим самим визначаємо режим роботи акселерометра, при якому він вимірюває показання по всіх осях в межах від -2G до +2G.

- LIS3DSH_FILTER_BW800: значення 0×00: біти ширини смуги пропускання фільтра згладжування. Ми їх не встановлюємо, тому ширина смуги пропускання у нас буде 800 Гц.
- LIS3DSH_SENSITIVITY_0_06G. Тут ми налаштовуємо чутливість датчика до 0.06 mg.

Зчитування молодших та старших байтів 16-бітних показань, виміряних за кожною з трьох осей, виконується наступним чином:

- Accel_IO_Read(&ecrtl, LIS3DSH_CTRL_REGS5_ADDR, 1);
- Accel_IO_Read((uint$_t*)&buffer[0], LIS3DSH_OUT_X_L_ADDR, 1);
- Accel_IO_Read((uint$_t*)&buffer[1], LIS3DSH_OUT_X_H_ADDR, 1);
- Accel_IO_Read((uint$_t*)&buffer[2], LIS3DSH_OUT_Y_L_ADDR, 1);
- Accel_IO_Read((uint$_t*)&buffer[3], LIS3DSH_OUT_Y H_ADDR, 1);
- Accel_IO_Read((uint$_t*)&buffer[4], LIS3IDSH_OUT_Z_L_ADDR, 1);
- Accel_IO_Read((uint8_t*)&buffer[5], LIS3DSH_OUT_Z_H_ADDR, 1).

## Висновки

Спроектовано та реалізовано фізичну модель системи, яка включає мікроконтролер, трьохосьовий цифровий акселерометр LIS3DSH, яка характеризується високими економічними показниками технічного рішення.

Розроблено та реалізовано спеціалізоване ПЗ системи, яке включає драйвер для налаштування, збору і опрацювання даних з акселерометра та відповідне ПЗ для побудови графіків сигналів віброприскорення в часовій і частотній областях. Побудоване ПЗ дає змогу реалізувати широкі функціональні можливості та є вільно використовуваним.

Побудована система дає можливість проводити аналіз параметрів вібрації з метою передбачення і запобігання можливих аварій, зменшуючи таким чином затрати, які пов'язані з виходом із ладу дорогих деталей і вузлів.

## Список джерел інформації:


Аврунін, О. Г., Запорожець, О. В., Носова, Т. В., Семенець В. В. (2015). *Мікропроцесори в інформаційно-вимірювальних системах: Навчальний посібник.* Харків. http://openarchive.nure.ua/handle/document/5291

Аврунін, О. Г. та ін. (2019). Основи реєстрації та аналізу біосигналів: Навчальний посібник. Харків. https://doi.org/10.30837/978-966-659-257-9

Зубков, О. В., Свид, І. В., Воргуль, О. В., Семенець, В. В. (2022). *Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах: Навчальний посібник.* Дніпро.

Леонідов, В. І., Семенець, В. В. (2019). Особливості амплітудно-часової структури перешкод у системах акустичного зондування атмосфери. *Радіотехніка: Всеукраїнський міждисциплінарний науково-технічний збірник*, *197*, 93-99.

Семенець, В. В., Леонідов, В. І. (2020a). Аналіз частотно-часової структури акустичних шумів малих автоматичних аеросистем. *Радіотехніка: Всеукраїнський міждисциплінарний науково-технічний збірник*, *202*, 147-152. https://doi.org/10.30837/rt.2020.3.202.15

Семенець, В. В., Леонідов, В. І. (2020b). Дослідження амплітудно-частотних характеристик біологічних тканин. *Радіотехніка: Всеукраїнський міждисциплінарний науково-технічний збірник*, *203*, 186-190. https://doi.org/10.30837/rt.2020.4.203.20

Семенець, В. В., Леонідов, В. І. (2023). Використання мікроконтролера stm32f407vg для дослідження амплітудно-частотних характеристик біологічних тканин. *Радіотехніка*, *214*, 93-99.

Albarbar, A. et al. (2008). Suitability of MEMS accelerometers for condition monitoring: An experimental study. *Sensors*, *8*(2), 784-799. https://doi.org/10.3390/s8020784

Chaudary, S. B., Sengupta, M., & Mukherjee, K. (2014). Vibration monitoring of rotating machines using MEMS accelerometer. *Intern. Journal of Sceintific Engineering and Research*, *2*(9), 5-11.

Goyal, D., & Pabla, B. S. (2016). Development of non-contact structural health monitoring system for machine tools. *Journal of Applied Research and Technology*, *14*(4), 245-258. https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.06.003

Hjort, A., & Holmberg, M. (2015). *Measuring mechanical vibrations using an Arduino as a slave I/O to an EPICS control system*. Uppsala University.

Leonidov, V. I. (2014). Analysis of the models and structure of echo signals of the atmospheric acoustic sounding. *Telecommunications and Radio Engineering*, *73*(16), 1497-1502.

Milovančević, M. et al. (2014). Embedded systems for vibration monitoring. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, *12*(2). 171-181.

Rață, G., & Rață, M. (2014). System for Monitoring and Analysis of Vibrations at Electric Motors. Intern. *Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, *XXI*(3), 97-104.

Rocha, S. M. S. et al. (2016). Method to measure displacement and velocity from acceleration signals. *Intern. Journal of Engineering Research and Applications*, *6*(6), 52-59.

Sekiya, H., Kimura, K., & Miki C. (2016). Technique for determining bridge displacement response using. *MEMS Accelerometers*, *16*(2), 257. https://doi.org/10.3390/s16020257

Semenetz, V. V., & Leonidov, V. I. (2019). Model-structural analysis of combination interference in the problems acoustic sounding of the atmosphere. *Telecommunications and Radio Engineering*, *78*(12), 1078-1095. https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i12.60