

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА STM32F407VG ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ АКСЕЛЕРОМЕТРОМ LIS3DSH

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 необхідний 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 автомобіля і всього 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.д.

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

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми вібраційної діагностики обладнання

Розробленню систем моніторингу та аналізу вібрацій присвячено різні науково-технічні статті. Зокрема, в [1] розроблено систему моніторингу та аналізу вібрацій, що виникають в електромоторах. 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 [3]. В роботі [2] 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 pomp з турбонадувом 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 [2]. В статті [3] описано метод визначення переміщення та швидкості з сигналів прискорення отриманих з акселерометрів, а в [4] розроблено методику моніторингу надійності мостових конструкцій з використанням MEMS акселерометри. В [4] побудовано систему моніторингу верстатів і процесів механічної обробки. 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 [5] досліджена придатність мікроелектромеханічних (MEMS) акселерометрів для моніторингу стану верстатів з ЧПК. Тести проведено на реально-діючому верстаті з ЧПК в типовому промисловому цеху. Показано, що MEMS 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 [6]. 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 [7 - 8]. 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 розглянутого кола задач можна віднести методи, описані в роботах [1, 3]. 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 [9 - 14]. 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 датчиків є малий розмір корпусу та низька ціна. Більшість таких датчиків підтримують інтерфейс SPI. З найбільш сучасних моделей можливо виділити LIS3DSH, який позиціонується виробником як спеціалізоване рішення для розробки віброметрів промислового обладнання.

LIS3DSH - це датчик руху з цифровим виходом (виготовлений по технології MEMS).

Застосування:

Інтерфейс користувача для керування 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 $\pm 2g/\pm 4g/\pm 6g/\pm 8g/\pm 16g$ і він здатний вимірювати прискорення зі швидкістю вихідних даних від 3,125 Гц до 1,6КГц. Можливість самоперевірки дозволяє користувачеві перевірити роботу датчика в кінцевому застосуванні.

Самоперевірка

Самоперевірка дозволяє перевірити працездатність датчика, не переміщаючи його. Функція самотестування вимкнена, коли біт самотестування (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.

Інтерфейс шини SPI

LIS3DSH для SPI є веденою шиною. SPI дозволяє записувати та читати регістри пристрою.

Послідовний інтерфейс взаємодіє із зовнішнім світом за допомогою 4 проводів: 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.

Опис програмно-апаратного комплексу

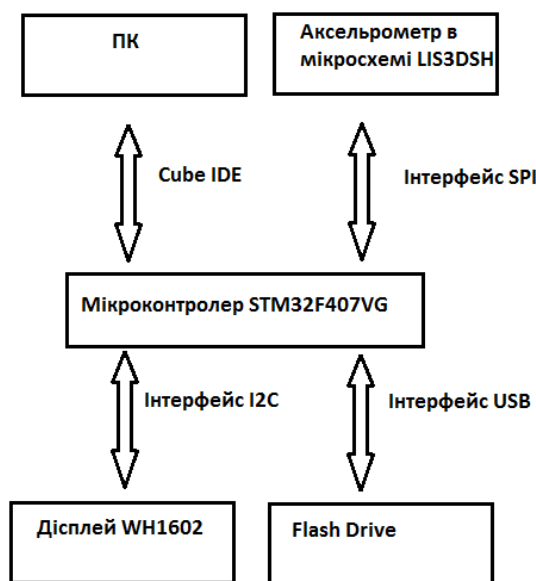


Рис. 1. Структурна схема програмно-апаратного комплексу

Апаратне забезпечення системи побудоване на МК STM32F407VG і трьохосьовому цифровому акселерометрі LIS3DSH (рис. 1). 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 виміру 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.

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 вібро швидкостей, вібро прискорень і вібро переміщень.

В частотному діапазоні може бути встановлений ряд границь попереджувальних 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 границь 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 з переривання 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 виконання з кроку 6.

Розроблені наступні функції:

void Accel_Ini (void) – функція ініціалізації датчика;

static void Error (void) – функція-обробник помилки;

Accel_IO_Read (uint16_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(uint16_t InitStruct) – функція ініціалізації налаштувань;

void Accel_GetXYZ (uint16_t* pData) – функція зчитування показників аксельрометра;

static uint8_t SPIx_Write Read (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 0x60: даним значенням ми включимо біти ODR1 та ODR2, тим самим налаштуємо швидкість передачі даних 100 герц;

LIS3DSH_XYZ_ENABLE: значення 0x07: включимо біти всіх осей, тим самим скажемо датчику про те, щоб він нам зчитував дані всіх трьох осей (x, y та z);

LIS3DSH_SERIALINTERFACE_4WIRE: значення 0x00: цей біт відповідає за включення режиму інтерфейсної шини. Залишаємо 0, тим самим ми включимо 4-провідний SPI;

LIS3DSH_SELFTEST_NORMAL: значення 0x00: 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 0x00: біти FSCALE ми також не включимо, тим самим скажемо акселерометру, щоб він вимірював показання по всіх осях в межах від -2G до +2G;

LIS3DSH_FILTER_BW800 : значення 0x00: біти ширини смуги пропускання фільтра згладжування. Ми їх не встановлюємо, тому ширина смуги пропускання у нас буде 800 герц;

LIS3DSH_SENSITIVITY_0_06G. Тут ми налаштуємо чутливість датчика до 0.06 mg.

Висновки

Спроектовано та реалізовано фізичну модель системи, яка включає мікроконтролер, трьохосьовий цифровий акселерометр LIS3DSH, яка характеризується низькою ціною 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 вібро прискорення 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, пов'язані з виходом із ладу дорогих деталей і вузлів.

Список літератури:

1. Raă G. System for Monitoring and Analysis of Vibrations at Electric Motors / G. Raă, M. Raă // Intern. Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2014. Vol. XXI, Is. 3. P. 97–104.
2. Milovančević M. Embedded Systems for Vibration Monitoring / M. Milovančević, A. Veg, A. Makedonski, J. Stefanović Marinović // Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering. 2014. Vol. 12, Is. 2. P. 171–181.
3. Rocha S. M. S. Method to Measure Displacement and Velocity from Acceleration Signals / S. M. S. Rocha, J. F. S. Feiteira, P. S. N. Mendes, U. P. B. Da Silva, R. F. Pereira // Intern. Journal of Engineering Research and Applications. 2016. Vol. 6, Is. 6. P. 52–59.
4. Sekiya H. Technique for Determining Bridge Displacement Response Using MEMS Accelerometers / H. Sekiya, K. Kimura, C. Miki // Sensors. 2016. Vol. 16, Is.2. P. 257. doi: 10.3390/s16020257
5. Goyal D. Development of non-contact structural health monitoring system for machine tools / D. Goyal, B. S. Pabla // Journal of Applied Research and Technology. 2016. Vol. 14, Is.4. P. 245–258. doi: 10.1016/j.jart.2016.06.003
6. Albarbar A. Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study / A. Albarbar, S. Mekid, A. Starr, R. Pietruszkiewicz // Sensors. 2008. Vol. 8, Is. 2. P. 784–799. doi: 10.3390/s8020784
7. Hjord, A. Measuring mechanical vibrations using an Arduino as a slave I/O to an EPICS control system / A. Hjord, M. Holmberg. Uppsala University, 2015. 25 p. Not a reprint
8. Chaudary, S. B. Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer/ S. B. Chaudary, M. Sengupta, K. Mukherjee // Intern. Journal of Scientific Engineering and Research. 2014. Vol. 2, Is. 9.
9. Semenetz V.V., Leonidov V.I. Model-structural analysis of combination interference in the problems acoustic sounding of the atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Is. 12. P. 1078–1095. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i12.60
10. Leonidov V.I. Analysis of the models and structure of echo signals of the atmospheric acoustic sounding // Telecommunications and Radio Engineering. 2014. 73(16). P. 1497–1502.
11. Семенець В.В., Леонідов В.І. Використання мікроконтролера stm32f407vg для дослідження амплітудно-частотних характеристик біологічних тканин // Радіотехніка: 2023. Вип. 214. С. 93–99.
12. Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах : навч. посіб. / О. В. Зубков, І. В. Свид, О. В. Воргуль, В. В. Семенець. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 144 с.

13. Аврунін О.Г., Запорожець О.В., Носова Т.В., Семенець В.В // Мікропроцесори в інформаційно-вимірвальних системах : навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2015. 180 с.
<http://openarchive.nure.ua/handle/document/5291>

14. Основи реєстрації та аналізу біосигналів : навч. посіб. / О.Г. Аврунін, В.Г. Абакумов, З.Ю. Готра, С.М. Злепко, А.В. Кіпенський, С.В. Павлов, В.В. Семенець. Харків : ХНУРЕ, 2019. 400 с.
<https://doi.org/10.30837/978-966-659-257-9>

15.02.2023

Відомості про авторів:

Семенець Валерій Васильович – д-р техн. наук, професор. Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри біомедичної інженерії, Україна; e-mail: valery.semenets@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8969-2143>

Григор'єв Олександр Вікторович – канд. техн. наук, доц., Харківський національний університет радіоелектроніки; Україна; e-mail: oleksandr.hryhoryev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6467-7983>