

**В. М. Теслиук, Н. С. Ріпак, А. І. Головатий, Ю. В. Опотяк, Т. В. Теслиук**

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

## АПАРАТНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СПЕКТРУ ВІБРОПРИСКОРЕНЬ

Вібрація серед усіх видів механічних впливів для технічних об'єктів найбільш небезпечна. Знакозмінні напруження, викликані вібрацією, сприяють накопиченню пошкоджень у матеріалах, конструкції системи та руйнуванню. Досить швидко руйнування об'єкта настає при вібраційних впливах за умов резонансу. Водночас, вібрація викликає порушення фізіологічного та функціонального станів людини. Вплив вібрації на людину залежить від її спектрального складу, напрямку дії, тривалості впливу, а також від індивідуальних особливостей особи. У випадку впливу на людину зовнішніх коливань (хитавиці, струсів, вібрації) відбувається їхня взаємодія з внутрішніми хвильовими процесами, виникнення резонансних явищ. Так, зовнішні коливання, із частотою менш 0,7 Гц, утворюють хитавицю і порушують у людини нормальну діяльність вестибулярного апарату. Інфразвукові коливання (менш 16 Гц), впливаючи на людину, пригнічують центральну нервову систему, викликаючи почуття тривоги та страху. За певної інтенсивності на частоті 6...7 Гц інфразвукові коливання, втягуючи у резонанс внутрішні органи і систему кровообігу, здатні викликати травми, розриви артерій тощо.

Розроблено структуру системи моніторингу спектру віброприскорень, яка ґрунтується на модульному принципі та включає мікроконтролер, акселерометр, рідкокристалічний графічний кольоровий дисплей, флеш пам'ять, монітор мікрокомп'ютера. Розроблено алгоритми системи моніторингу спектру віброприскорень, що включає алгоритм калібрування акселерометра, алгоритм вимірювання динамічних прискорень та алгоритм швидкого перетворення Фур'є. Визначено інтерфейс ГС для обміну даними між акселерометром ADXL345 та мікрокомп'ютером Raspberry Pi 3 Model B. Розроблено програмне забезпечення, що опрацьовує вхідну інформацію від декількох підключених до Raspberry Pi акселерометрів, що дає змогу проводити багатоканальні вимірювання і їхній аналіз. Наведено результати тестування побудованої системи, які дають змогу стверджувати про правильність та коректність функціонування розробленої системи.

**Ключові слова:** система моніторингу спектру віброприскорень, віброприскорення, спектральний аналіз, апаратне та програмне забезпечення, дискретне перетворення Фур'є, ADXL345, Raspberry Pi 3.

### Вступ / Introduction

Одним із найважливіших параметрів будь-якої проєктованої технічної системи є її надійність функціонування в несприятливих умовах. Джерелом таких несприятливих умов можуть бути вібрації та удари. Вібрація серед усіх видів механічних впливів для технічних об'єктів найбільш небезпечна. Знакозмінні напруження, викликані вібрацією, сприяють накопиченню пошкоджень у матеріалах, конструкції системи та руйнуванню. Досить швидко руйнування об'єкта настає при вібраційних впливах за умов резонансу; водночас, вібрація викликає порушення фізіологічного та функціонального станів людини. Вплив вібрації на людину залежить від її спектрального складу, напрямку дії, тривалості впливу, а також від індивідуальних особливостей особи [1].

При оцінці вібраційного впливу на людину потрібно враховувати, коливальні процеси, які притаманні живому організму. В основі серцевої діяльності і кровообігу та біострумів мозку людини є ритмічні коливання. Внутрішні органи людини можна розглядати як коливальні системи з пружними зв'язками. Частоти їх власних коливань є у діапазоні 3–6 Гц. Частоти власних коливань плечового пояса, стегон і голови щодо опорної поверхні (положення стоячи) складають 4–6 Гц, голови щодо пліч (положення сидячи) 25–30 Гц.

У випадку впливу на людину зовнішніх коливань (хитавиці, струсів, вібрації) відбувається їхня взаємодія з внутрішніми хвильовими процесами, виникнення резонансних явищ. Так, зовнішні коливання, із частотою менше 0,7 Гц, утворюють хитавицю і порушують у людини нормальну діяльність вестибулярного апарату. Інфразвукові коливання (менше 16 Гц), впливаючи на людину, пригнічують центральну нервову систему, викликаючи почуття тривоги та страху. За певної інтенсивності на частоті 6...7 Гц інфразвукові коливання, втягуючи у резонанс внутрішні органи і систему кровообігу, здатні викликати травми, розриви артерій тощо [2].

Вібраційна хвороба розвивається внаслідок постійного роздратування механорецепторів, що виникає під впливом вібрації, і деформації тілець Фатера-Пачіні, яка призводить до перероздратування вище розташованих нервових центрів (симпатичних гангліїв, спинного мозку, ретикулярної формації) і порушення їх функціонування. Порушення функції центральної нервової системи при вібраційній хворобі передусім виражається в розладі регулювання судинного тонуусу з розвитком ангіоспазму і артеріальної гіпертензії. Внаслідок ангіоспазму порушуються трофічні процеси переважно в тканинах опорно-рухового і нервово-м'язового апарату. Таким чином, вібраційна хвороба має тип ангіотрофозу, який може набувати генералізованого типу [3].

Відповідно, системи моніторингу вібрацій дають змогу вирішити багаточислені проблеми, пов'язані з вібраціями, які виникають при роботі різних систем технологічного обладнання (механізмів, машин, верстатів із ЧПК) [4, 5], та мінімізувати їх вплив на людський організм [6]. Отже, розроблення систем, призначених для моніторингу та аналізу вібрацій технічних об'єктів, є актуальним питанням сьогодення.

*Об'єкт дослідження* – процес моніторингу спектру віброприскорень.

*Предмет дослідження* – моделі та засоби моніторингу спектру віброприскорень.

*Мета роботи* – підвищення ефективності моніторингу і контролю вібрацій технологічного обладнання на основі розроблення системи моніторингу віброприскорень, яка ґрунтується на модульному принципі, низькій вартості технічного рішення та кросплатформності програмного забезпечення.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- розробити структуру системи моніторингу спектру віброприскорень, яка ґрунтується на модульному принципі та включає мікроконтролер, акселерометр, рідкокристалічний графічний кольоровий дисплей, флеш пам'ять, монітор мікрокомп'ютера;
- розробити алгоритмічне забезпечення системи моніторингу спектру віброприскорень, яка включає алгоритм калібрування акселерометра, алгоритм вимірювання динамічних прискорень та алгоритм швидкого перетворення Фур'є;
- розробити програмне забезпечення для опрацювання вхідної інформації від декількох підключених до Raspberry Pi акселерометрів, що дасть змогу проводити багатоканальні вимірювання і їхній аналіз;
- визначити інтерфейс для обміну даними між акселерометром ADXL345 та мікрокомп'ютером Raspberry Pi 3 Model B;
- провести тестування розробленої системи моніторингу спектру віброприскорень.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* У 2002 році Парламент і Комісія Європейського Співтовариства узгодили “мінімальні вимоги до охорони здоров'я та безпеки” щодо ризиків впливу на працівників, спричинених вібрацією. Директива визначає якісні вимоги, а також кількісні вимоги у формі “значень експозиційної дії” та “граничних значень впливу”. Кількісні вказівки базуються на вказівках міжнародних стандартів щодо вібрації, що передається рукам (ISO 5349), і вібрації всього тіла (ISO 2631) [7].

Розробленню систем моніторингу та аналізу вібрацій присвячено різні науково-технічні статті. Зокрема, в роботі “System for Monitoring and Analysis of Vibrations at Electric Motors” [8] розроблено систему аналізу вібрацій, що виникають в електромоторах. Система використовує п'єзоелектричний акселерометр ICP 603C11 [9] і плату збирання даних від National Instruments (NI 6009) [10]. Вібраційні сигнали зчитуються системою з різних частин електричних моторів і передаються на комп'ютер із використанням плати збирання даних. Синтезований віртуальний інструмент дає змогу в реальному часі моніторити і проводити Фур'є аналіз отриманих сигналів від сенсора вібрацій. Розроблена система використовує LabView [10].

В роботі “Embedded Systems for Vibration Monitoring” авторів Miloš Milovančević, Aleksandar Veg, Aleksandar Makedonski, Jelena Stefanović Marinović [11] розроблено вбудовану систему для моніторингу вібрацій насосного агрегату на базі мікроконтролера від компанії Microchip. Програмне забезпечення для збирання і аналізу даних оптимізовано для тестування помп з турбонадувом із швидкостями обертання до 2000 об/хв. Обмеження програмного забезпечення встановлено на автоматичну діагностику, але може бути налаштоване для індивідуальної і ручної вібродіагностики. Єдиним обмеженням системи є характеристики використаного акселерометра. Автори провели велику кількість вимірювань за допомогою розробленої системи на різних турбоагрегатах для визначення експлуатаційних умов насосних агрегатів.

В роботі “Method to Measure Displacement and Velocity from Acceleration Signals” авторів Said M. S. Rocha, José Flávio S. Feiteira, Priscila S. N. Mendes, Uile P. B. Da Silva, Rômulo F. Pereira [12] розроблено метод визначення переміщення та швидкості з сигналів прискорення, отриманих із акселерометрів, а в “Technique for Determining Bridge Displacement Response Using MEMS Accelerometers” – Sekiva H., Kimura K., Miki C [13]. Розроблено методіку моніторингу надійності мостових конструкцій, використовуючи MEMS акселерометри. В цьому випадку під MEMS акселерометрами маються на увазі акселерометри, виготовлені з використанням технологій з мікроелектромеханічних систем [14].

В статті “Development of non-contact structural health monitoring system for machine tools” авторів Deepam Goyal, B. S. Pabla [15] побудовано систему моніторингу верстатів механічної оброблення деталей. Система збирання вібраційного сигналу ґрунтується на мікроконтролері Arduino, який підключено до комп'ютера через порт USB. Спеціально розроблене програмне забезпечення використовує LabVIEW та зчитує і опрацьовує дані в реальному масштабі часу. Особливістю такої системи є її низька вартість технічного рішення.

В роботі “Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study” авторів Alhussein Albarbar, Samir Mekid, Andrew Start, та Robert Pietruszkiewicz [16] досліджена придатність мікроелектромеханічних акселерометрів для моніторингу стану верстатів із числовим програмним управлінням. Авторами наведені результати проведених тестів на реально-діючому верстаті з ЧПК у типовому промисловому цеху. Показано, що MEMS давачі можуть бути хорошою альтернативою стандартним сенсорам вібрації, оскільки вони не потребують електрометричних підсилювачів. Вибір такого давача має бути зроблений відповідно до вимог практичного застосування і результату тесту на придатність. MEMS давачі можуть використовуватися у жорстких умовах, використовуючи спеціальне упакування.

В статті “Measuring mechanical vibrations using an Arduino as a slave I/O to an EPICS control system” авторів Hjort A., Holmberg M. [17] спроектовано і реалізовано на мікроконтролері Arduino апаратно-програмну систему вимірювання механічних вібрацій. В якості давачів вібрації використано акселерометри ADXL335 [18]. Тестування розробленої системи автори проводили шля-

хом моніторингу вібрацій вакуумної помпи. Отримані результати дослідження показали можливість і доцільність розроблення вбудованих систем моніторингу вібрацій у реальному масштабі часу, з використанням недорогого апаратного та програмного забезпечення.

Використання іншого типу мікроконтролера наведено в роботі “Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer” авторів Subimal Bikash Chaudhury, Mainak Sengupta, Kaushik Mukherjee [19]. Зокрема, авторами запропоновано розроблену систему моніторингу вібрацій ротаційних машин та верстатів. Система вимірювання побудована на мікроконтролері PIC-18F6520 і акселерометрі ADXL322. Авторами проведено дослідження на перевірку можливості реєструвати піки частот появи відмов для різних випадків несправностей. Отже, проведений аналіз існуючих підходів та технічних рішень дає змогу стверджувати про необхідність розроблення якісно нової недорогої відкритої апаратно-програмної системи моніторингу вібрацій в реальному масштабі часу. Така система має бути побудована на доступних і недорогих комплектуючих, відкритому програмному забезпеченні та з можливістю модифікації або розширення її функціональних можливостей відповідно до вимог та області застосування.

Стаття включає вступ, аналіз літературних джерел із постановкою досліджуваної проблеми. У розділі “Розроблення структури та інформаційного забезпечення системи моніторингу спектру віброприскорень” наведено розроблену структуру системи та особливості її апаратної реалізації. Апаратна реалізація ґрунтувалась на використанні недорогих складових, щоб забезпечити низьку ціну технологічного рішення. Окрім того, в цьому розділі вибрано I<sup>2</sup>C для реалізації обміну даними між складовими системи моніторингу спектру віброприскорень. В розділі “Алгоритмічне забезпечення проектованої системи” описано основні кроки роботи алгоритму. Розділ “Розроблення програмного забезпечення системи моніторингу віброприскорень” включає інформацію про розроблену структуру програмного забезпечення та короткий опис конкретної складової. В розділі “Отримані результати та їх аналіз” наведено результати тестування розробленої системи. У висновках сформульовані основні результати виконаних досліджень.

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

*Розроблення структури та інформаційного забезпечення системи моніторингу спектру віброприскорень.*

Розроблена структура системи моніторингу спектру віброприскорень наведена на рис. 1 та включає такі основні складові:

- одноплатний МК Raspberry Pi 3 Model B [28, 29], який призначений для збирання і опрацювання даних із давача вібрації (акселерометра);
- трьохосьовий цифровий акселерометр ADXL345 фірми Analog Devices, який використано в якості давача віброприскорень;
- флеш (FLASH) пам'ять для встановлення ОС, драйверів, ПЗ і збереження даних;
- рідкокристалічний графічний кольоровий 7” TFT дисплей для виводу інформації з Raspberry Pi 3;
- монітор мікрокомп'ютера;
- інтерфейси бездротової комунікації для віддаленого обміну інформацією з ПК.

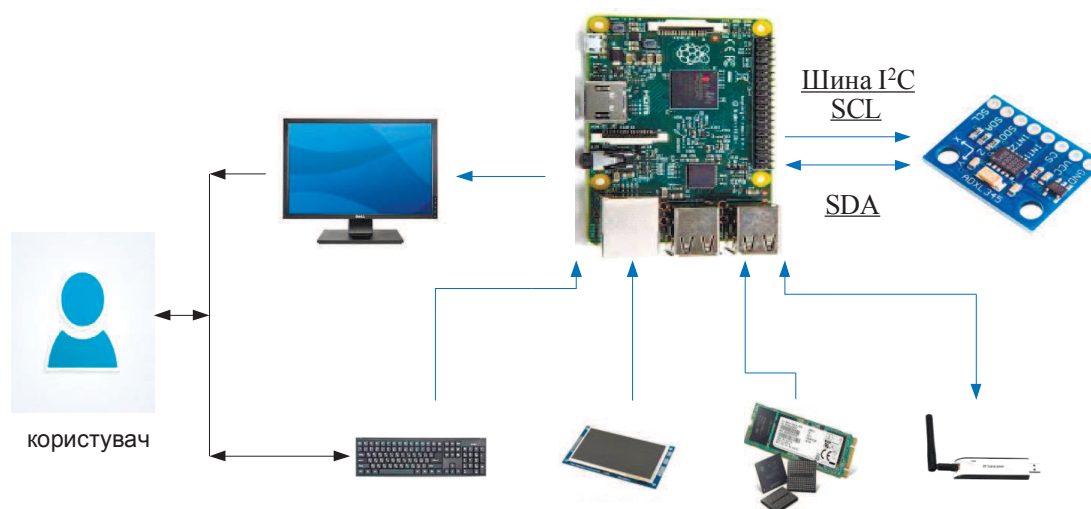
Формалізувати структуру системи можна із використанням картеля:

$$\text{Стр\_системи} = \langle M_{331}, M_{3031}, M_{3В1} \rangle, \quad (1)$$

де  $M_{331}$  – множина складових, які належать до засобів збирання інформації;  $M_{3031}$  – множина засобів збирання, опрацювання та збереження інформації;  $M_{3В1}$  – множина засобів відображення інформації.

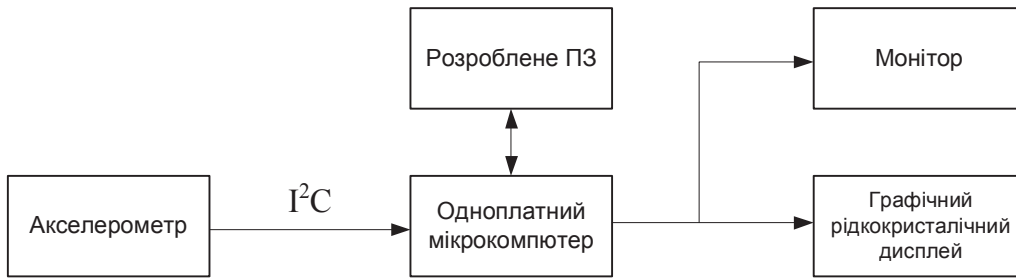
Множина засобів збирання інформації про віброприскорення включає акселерометр (у процесі вдосконалення або розширення функціональних можливостей системи буде включати кілька акселерометрів, або інших давачів). Множина засобів збирання, опрацювання та збереження даних включає безпосередньо мікрокомп'ютер, флеш пам'ять, інтерфейси бездротової комунікації та інші складові. Множина засобів відображення інформації – монітор мікрокомп'ютера та рідкокристалічний графічний монітор.

Розроблена структура ґрунтується на модульному принципі, що забезпечує швидку модернізацію розробленого пристрою.



**Рис. 1.** Структура системи моніторингу спектру віброприскорень / The structure of the system for monitoring the vibration acceleration spectrum has been developed



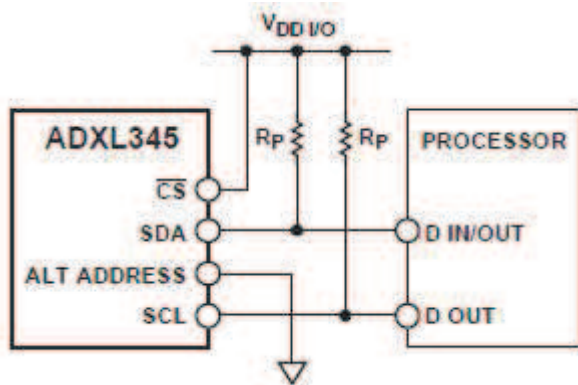


**Рис. 2.** Схема потоку даних у процесі читання даних з акселерометра / Data flow diagram in the process of reading data from the accelerometer

В структурі на рис. 1 використано акселерометр, який призначений для вимірювання віброприскорень. Отримані значення віброприскорень від акселерометра передаються на одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi 3 Model B, який опрацьовує отримані дані з використанням розробленого програмного забезпечення та передає результати опрацювання на монітор мікрокомп'ютера і графічний рідкокристалічний дисплей (рис. 2). Обмін даними між складовими структури необхідно реалізувати з використанням стандартизованих інтерфейсів (шин), що дає змогу не розробляти власний інтерфейс, уникнути помилок та заощадити час на розробку.

На сьогодні наявні кілька стандартних інтерфейсів, які використовуються для обміну даними між складовими обладнання. Зокрема, інтерфейс I<sup>2</sup>C є одним із найпростіших, який стандартизований та використовується для обміну даними у виробничих системах.

Схема підключень акселерометра до МК Raspberry Pi 3 Model B зображена на рис. 3.



**Рис. 3.** Рекомендована схема двох дротового підключення акселерометра ADXL345 по інтерфейсу I<sup>2</sup>C до процесора / The recommended two-wire connection scheme of the ADXL345 accelerometer via the I2C interface to the processor

Отже, для реалізації обміну даними між складовими системи моніторингу спектру віброприскорень запропоновано використовувати шину I<sup>2</sup>C. Використання акселерометра ADXL345 та мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3 Model B при апаратній реалізації системи моніторингу спектру віброприскорень забезпечує низьку ціну проектованої системи.

*Алгоритмічне забезпечення синтезованої системи моніторингу спектру віброприскорень.*

*Алгоритм роботи системи.*

Розроблений алгоритм роботи системи моніторингу віброприскорень включає такі кроки:

Крок 1. Ініціалізація акселерометра ADXL345 на шині I<sup>2</sup>C.

Крок 2. Читання значення прискорення з регістра ADXL345\_DEVID за адресою 0x00 і перевірка номера акселерометра, який має бути рівний ADXL345\_ID 0xE5.

Крок 3. Налаштування акселерометра ADXL345.

Крок 4. Переведення давача прискорення в робочий режим (запис байту 0x00). Встановлюємо смугу пропускання 100 Гц (запис байту 0x0A) за допомогою функції ADXL345\_SetRegisterValue (ADXL345\_BW\_RATE, (0x00|ADXL345\_RATE (0x0A))).

Крок 5. Визначення формату вхідних даних, діапазону вимірювання 16, переривання, вирівнювання вимірних значень за допомогою функції ADXL345\_SetRegisterValue (ADXL345\_DATA\_FORMAT, (0x00|ADXL345\_RANGE(ADXL345\_RANGE\_PM\_16G)|ADXL345\_FULL\_RES)).

Крок 6. Проведення ADXL\_NO\_SAMPLES вимірювань (семплів) прискорення по всіх трьох осях x, y, z із кроком у  $t_s = 1e6/FS$ , де  $F_s$  – частота вибірки, і їх значення в двохбайтні цілочисельні масиви розмірами 1024.

Крок 7. Обчислення реальних значень прискорень  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  на часовому інтервалі від 0 до  $1e6/FS$  за формулою  $a_{xx}[i] \times g/LSB \times 9,80665$ ,  $xx$  – вісь вимірювання x, y або z. Коефіцієнт  $g/LSB$  при встановленому біті FULL\_RES = 1 у режимі з максимальною роздільною здатністю, рівний 0,0039. Запис отриманих значень у визначені масиви.

Крок 8. Запис обчислених значень прискорення у файли `fp_samples_ax`, `fp_samples_ay`, `fp_samples_az`, `fp_samples_a`.

Крок 9. Виклик функції `adxl345_spectrum_analysis` (ADXL\_NO\_SAMPLES, FS) для обчислення дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Крок 10. Запис отриманих даних спектрів у файли та побудова графіків функцій залежності прискорення від часу та спектрів віброприскорень.

Крок 11. Завершення роботи алгоритму. В іншому випадку перехід на крок 6.

*Алгоритм швидкого перетворення Фур'є для опрацювання даних у системі моніторингу спектру віброприскорень.*

В роботі використано бібліотеку FFTW для виконання швидкого перетворення Фур'є [20].

Бібліотека FFTW є набором модулів на мовах програмування C та Фортран для обчислення швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). FFTW дає змогу працювати як із дійсними, так і з комплексними числами, з довіль-

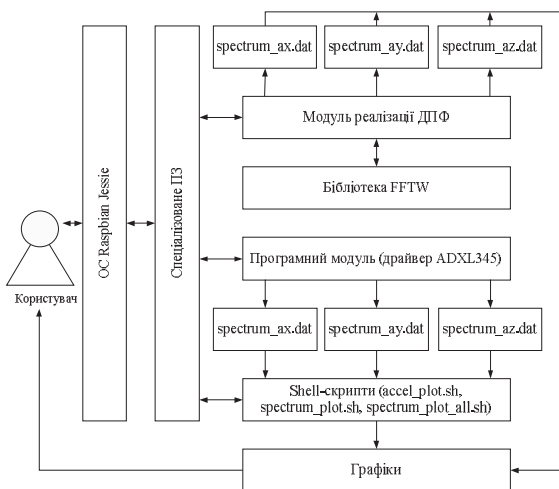
ним розміром вхідних даних, тобто з довжиною даних, яка не обов'язково є кратною  $2^n$ . Бібліотека також включає модулі паралельної оброблення ШПФ, які дають змогу використовувати її на багато процесорних машинах із загальною і розподіленою пам'яттю. FFTW складається з чотирьох різних варіантів обчислення ШПФ, а саме: одновимірне перетворення Фур'є для комплексних чисел, багатовимірне перетворення Фур'є для комплексних чисел, одновимірне перетворення Фур'є для дійсних чисел, багатовимірне перетворення Фур'є для дійсних чисел.

*Розроблення програмного забезпечення системи моніторингу віброприскорень.*

Для роботи з давачем прискорення (акселерометром) ADXL345, розроблено драйвер і спеціальне програмне забезпечення. Драйвер зчитує дані з акселерометра, їх опрацьовує та виконує налаштування давача відповідно до потреб користувача. Отримані значення прискорень для кожної осі записуються, відповідно, у файли ax.dat, ay.dat і az.dat. Драйвер акселерометра створено на мові C із використанням бібліотеки wiringPi<sup>2</sup>C[21] і компілятора gcc [22].

Написано shell-скрипти accel\_plot.sh, spectrum\_plot.sh, spectrum\_plot\_all.sh, що виконують побудову графіків. Програмне забезпечення розроблено під ОС Raspbian Jessie. Raspbian є безкоштовною ОС, яка побудована на Unix-подібній ОС Debian, оптимізований під технічне забезпечення одноплатного МК Raspberry Pi. Розроблене ПЗ забезпечує такі операції: користувацький інтерфейс системи; збір і аналіз даних; збереження даних у файли на microSD карті пам'яті; візуальне представлення даних; мережевий зв'язок із ПК. Структурна схема розробленого ПЗ системи зображена на рис. 4.

Окрім того розроблене ПЗ дає змогу здійснити безпосереднє порівняння відносної інтенсивності кожної частотної складової. Розроблене програмне забезпечення опрацьовує вхідну інформацію від декількох підключених до Raspberry Pi акселерометрів, що дає змогу проводити багатоканальні вимірювання і їхній подальший аналіз. ПЗ записує і зберігає дані про вібрації з кожного каналу з метою подальшого аналізу і співставлення. Така функція дає можливість користувачу відобразити інтенсивність вібрацій в реальному часі, а також перегляд вмісту записаних раніше файлів.



**Рис. 4.** Структурна схема ПЗ системи моніторингу спектру віброприскорень / Structural diagram of the software system for monitoring the spectrum of vibration accelerations

Приклади результатів зі значеннями прискорення та спектру зображено на рис. 5 – 7, відповідно.

Файл adxl345\_fft\_result.dat у першому стовпці містить значення частоти, а в другому стовпці результуюче (узагальнене) значення амплітуди віброприскорення по всіх трьох осях (рис. 5).

```
0 7.4838
0 3.62733
1 2.84792
2 2.40072
3 1.6004
4 0.99706
5 5.70699
6 2.78551
7 4.24751
8 5.41164
9 3.32313
10 0.717704
11 1.68054
12 2.0934
13 2.1794
14 0.782443
15 0.652032
16 0.959364
17 2.83923
18 3.06755
19 3.69518
20 2.18962
...
```

**Рис. 5.** Приклад фрагменту даних із файла adxl345\_fft\_result.dat / An example of a fragment of data from the file adxl345\_fft\_result.dat

У файлі ax.dat у першому стовпці записано час вимірювання, а в другому стовпці значення віброприскорення по осі X (рис. 6).

```
0.000000 -0.535443
0.001000 -9.752713
0.002000 0.382459
0.003000 0.229476
0.004000 -0.267722
0.005000 -0.803165
0.006000 -0.688427
0.007000 -0.688427
0.008000 -0.841411
0.009000 -0.841411
0.010000 -0.841411
0.011000 -0.841411
0.012000 -0.841411
0.013000 -0.841411
0.014000 -0.841411
0.015000 -0.917902
0.016000 -0.917902
0.017000 -0.917902
0.018000 -0.879657
0.019000 -0.879657
0.020000 -0.879657
0.021000 -0.841411
0.022000 -0.841411
...
```

**Рис. 6.** Приклад фрагменту даних із файла ax.dat / An example of a data fragment from the ax.dat file

У файлі spectrum\_az.dat у першому стовпці записано частоту, а в другому стовпці значення амплітуди віброприскорення по осі Z (рис. 7).

```

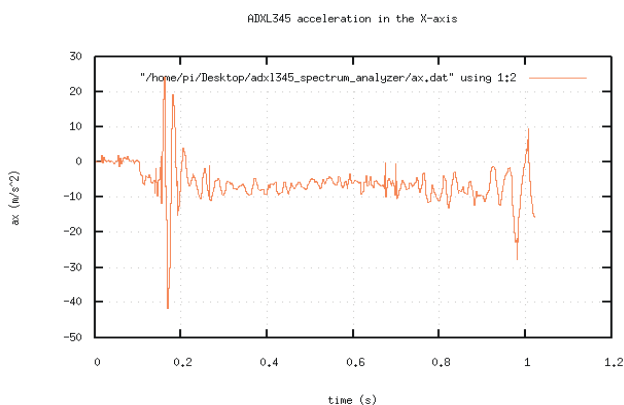
0 0.392469
0 0.0961468
1 0.0341103
2 0.0346067
3 0.0461253
4 0.0437036
5 0.0505748
6 0.0422889
7 0.0322649
8 0.10872
9 0.116219
10 0.027446
11 0.0534824
12 0.028848
13 0.041719
14 0.0332191
15 0.0442226
16 0.0247712
17 0.0171091
18 0.0316021
19 0.0264024
20 0.0400649
...

```

**Рис. 7.** Приклад фрагменту даних із файла spectrum\_az.dat / An example of a fragment of data from the spectrum\_az.dat file

Результати дослідження графічно зображено на рис. 8–19. Проведений аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати, що найбільший пік амплітуди віброприскорення припадає на вісь Y і є у діапазоні частот від 10 до 40 Гц. Оскільки експеримент проводився при вібраціях на частоті 20 Гц, то отриманий результат спектрального аналізу є достатньо достовірним.

На рис. 8 зображено графік зміни вихідного віброприскорення по осі X.



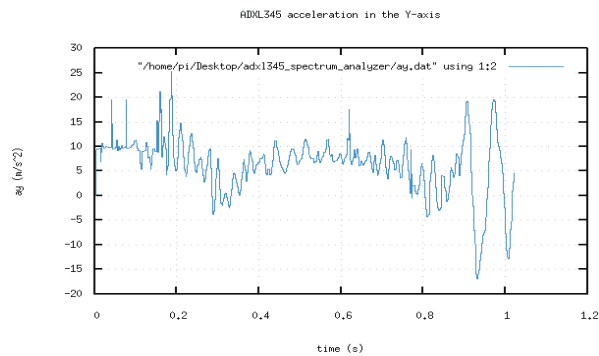
**Рис. 8.** Зміна вихідного сигналу прискорення акселерометра по осі X / Changing the output signal of the acceleration of the X-axis accelerometer

На рис. 9 зображено графік зміни вихідного віброприскорення по осі Y.

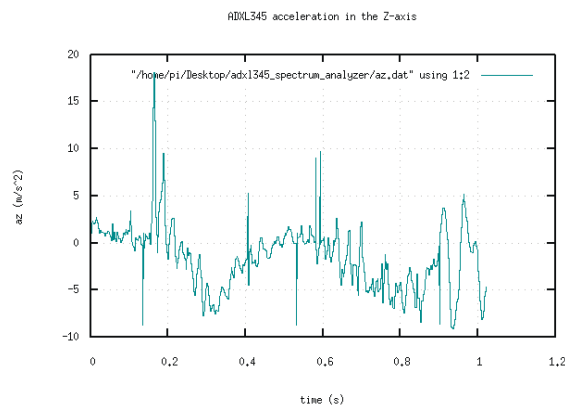
На рис. 10 зображено графік зміни вихідного віброприскорення по осі Z.

На рис. 11 зображено графік зміни сумарного віброприскорення по всіх трьох осях.

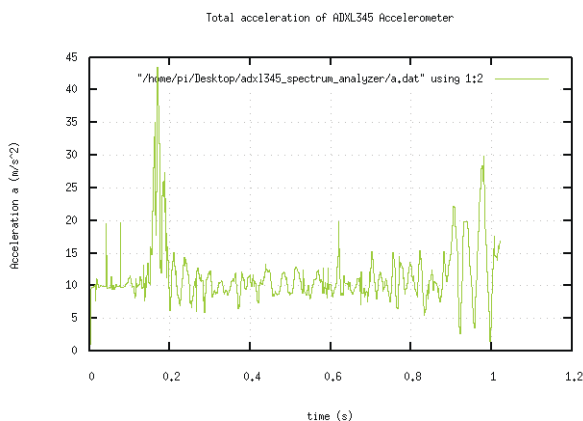
На рис. 12 зображено спектр сигналу віброприскорення по осі X.



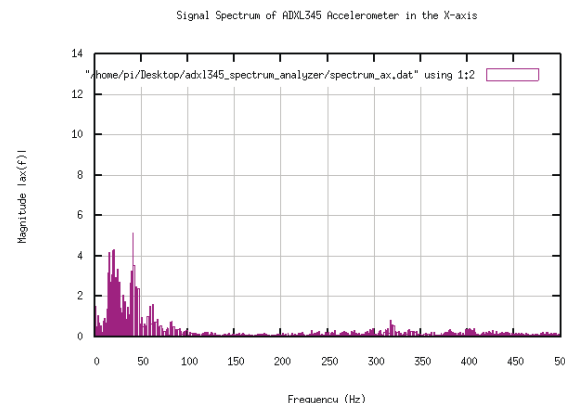
**Рис. 9.** Зміна вихідного сигналу прискорення акселерометра по осі Y / Change in the Y-axis acceleration output signal of the accelerometer



**Рис. 10.** Зміна вихідного сигналу прискорення акселерометра по осі Z / Changing the output signal of the accelerometer acceleration along the Z axis



**Рис. 11.** Зміна сумарного вихідного сигналу прискорення акселерометра по всіх трьох осях / Change in the total output signal of the acceleration of the accelerometer along all three axes



**Рис. 12.** Спектр сигналу віброприскорення по осі X / Spectrum of the vibration acceleration signal along the X axis

На рис. 13 зображено спектр сигналу віброприскорення по осі Y.

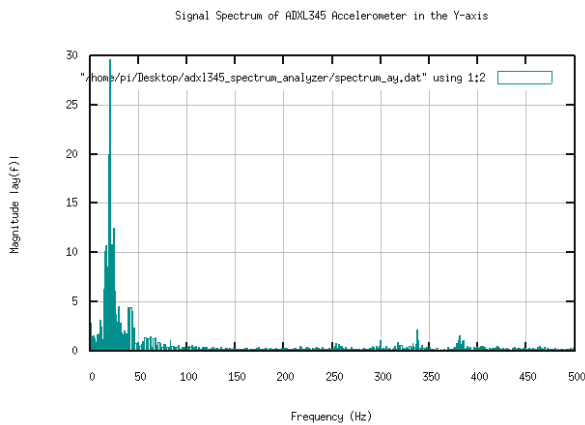


Рис. 13. Спектр сигналу віброприскорення по осі Y / Spectrum of the vibration acceleration signal along the Y axis

На рис. 14 зображено спектр сигналу віброприскорення по осі Z.

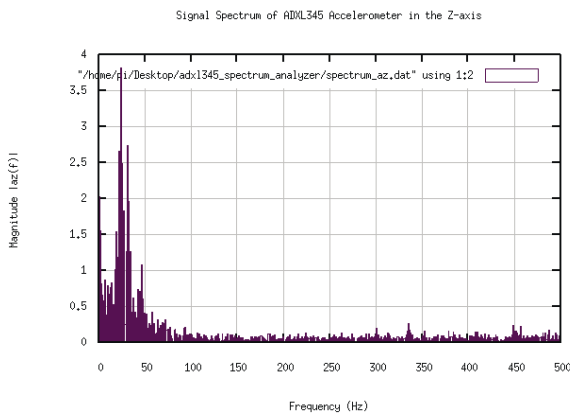


Рис. 14. Спектр сигналу віброприскорення по осі Z / The spectrum of the vibration acceleration signal along the Z axis

На рис. 15 зображено спектр результуючого (узагальненого) сигналу віброприскорення по всіх трьох осях.

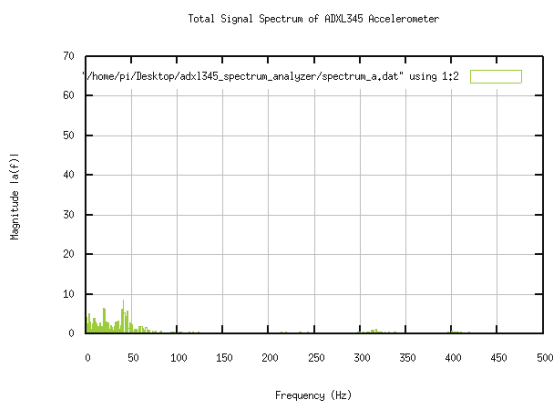


Рис. 15. Зміна сумарного вихідного спектру сигналу віброприскорення / Change in the total output spectrum of the vibration acceleration signal

На рис. 16 зображено зміну вихідного сигналу віброприскорення по осі X при ударі.

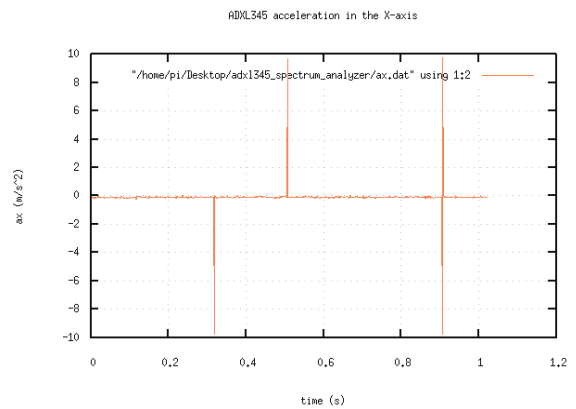


Рис. 16. Зміна вихідного сигналу прискорення акселерометра по осі X при ударі impact / Change in the output signal of the acceleration of the X-axis accelerometer during impact

На рис. 17 зображено зміну вихідного сигналу віброприскорення по осі Y при ударі.

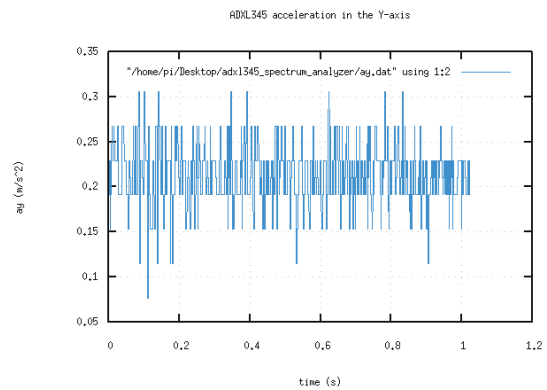


Рис. 17. Зміна вихідного сигналу прискорення акселерометра по осі Y при ударі impact / Change in the output signal of the acceleration of the Y-axis accelerometer during impact

На рис. 18 зображено зміну вихідного сигналу віброприскорення по осі Z при ударі.

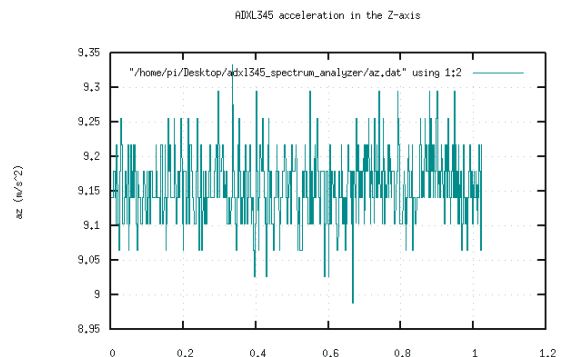


Рис. 18. Зміна вихідного сигналу прискорення акселерометра по осі Z при ударі / Change in the output signal of the acceleration of the accelerometer along the Z axis during impact

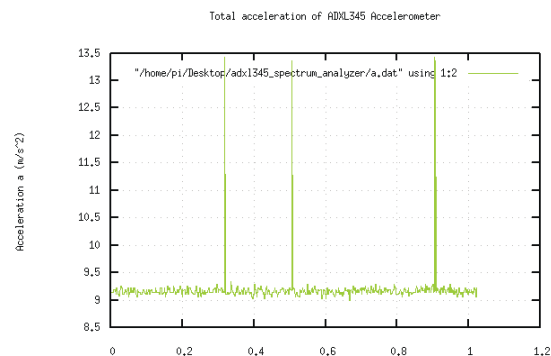


Рис. 19. Зміна сумарного вихідного сигналу прискорення акселерометра по всіх трьох осях при ударі / Change in the total output signal of the acceleration of the accelerometer along all three axes during impact



На рис. 19 зображено зміну узагальненого вихідного сигналу віброприскорення по всіх трьох осях при ударі.

**Обговорення результатів дослідження.** В роботі Vibration-based Structural Health Monitoring System for Bridges using ADXL345 Accelerometer with MATLAB Standalone Application [23], дослідники розробили моніторинг конструкцій на основі вібрації (VBSHM), із використанням акселерометра ADXL345 із мережею бездротових датчиків, із використанням радіочастотного модуля для виявлення тріщин і моніторингу стану мосту з метою запобігання катастрофічним наслідкам. Діяльністю системи керує мікроконтролер ATmega2560 Arduino, а для синхронізації часу додано модуль годинника реального часу. Для аналізу та запису даних створено окрему програму MATLAB. Дослідники використовували три сенсорні вузли як основний пристрій системи та базову станцію для моніторингу даних.

Авторами [24] розроблений прототип, який складається з акселерометра ADXL-345, Arduino mega, модуля Wi-Fi, РК-дисплея. Він виконує такі функції, як вимірювання вібрації, а також аналіз загальної вібрації, також порівняння зі стандартним пристроєм. Система використовуватиме чотири потрійних осі акселерометра ADXL-345, які сприймають вібрацію об'єкта та надсилають ці дані на Arduino. За допомогою модуля Wi-Fi перевіряються дані, які збираються з акселерометра.

У роботі Vibration Measuring Tools For Rotary Pumping Machine With Accelerometer MEMS [25] результати вимірювань аналізу вібрації у роторній машині відображені у вигляді частотного спектру за допомогою методу швидкого перетворення Фур'є (FFT) так, що цей датчик може робити обчислення швидше в отриманні даних у формі цифрових даних, порівняно з іншими MEMS-датчиками акселерометра без АЦП.

Авторами [26] отримана система на основі мікроконтролера Arduino під назвою "ERT-Ladister" із датчиком гіроскопа ADXL345. Інші функції включають SMS-шлюз, зумер і моніторинг через монітор. На основі перевірки здійсненності та перевірки ефективності в лабораторному та польовому масштабах можна зробити висновок, що система є здійсненою та ефективною.

Автори [27] пропонують керувати датчиком ADXL345 за допомогою Arduino Uno. Arduino Uno – це серія, розроблена на основі мікроконтролерів на базі ATmega328. Arduino Uno має 14 контактів входу/виводу, цифрові контакти, з яких 6 контактів можуть використовуватися як ШІМ (широкоімпульсна модуляція) сигнали. ADXL345 – це маленький і дуже тонкий акселерометр із низькою потужністю, необхідною для роботи. 3-осьовий акселерометр має високий (13-бітний) опір. Цифрові вихідні дані відформатовані як повні 16 біт і доступні через мікросхеми цифрового інтерфейсу SPI.

Отже, за результатами проведеного аналізу, система моніторингу спектру віброприскорень, яка ґрунтується на модульному принципі та використанні акселерометра ADXL345 та мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3 Model B, забезпечує низьку ціну технічного рішення, точність та коректність дослідження.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – полягає у розробленні моделі системи моніторингу спектру віброприскорень, яка характеризується низькою ціною технічного рішення.

*Практична значущість результатів дослідження* – полягає у розробленні структурної схеми системи, розробленні алгоритмічного та програмного забезпечень, системи моніторингу спектру віброприскорень, яка забезпечує низьку вартість технічного рішення.

## Висновки / Conclusions

1. Розроблено структуру системи моніторингу спектру віброприскорень, яка ґрунтується на модульному принципі та включає мікроконтролер, акселерометр, рідкокристалічний графічний кольоровий дисплей, флеш пам'ять, монітор мікрокомп'ютера. Використання акселерометра ADXL345 та мікрокомп'ютером Raspberry Pi 3 Model B забезпечує низьку ціну технічного рішення.

2. Розроблено алгоритмічне забезпечення системи моніторингу спектру віброприскорень, яка включає алгоритм калібрування акселерометра, алгоритм вимірювання динамічних прискорень та алгоритм швидкого перетворення Фур'є.

3. Визначено інтерфейс I<sup>2</sup>C для обміну даними між акселерометром ADXL345 та мікрокомп'ютером Raspberry Pi 3 Model B та описано особливості застосування I<sup>2</sup>C у реалізації системи моніторингу спектру віброприскорень. Розроблено спеціальне програмне забезпечення.

4. Розроблено спеціальне програмне забезпечення, яке опрацьовує вхідну інформацію від декількох підключених до Raspberry Pi акселерометрів, що дає змогу проводити багатоканальні вимірювання і їхній подальший аналіз. ПЗ записує і зберігає дані про вібрації з кожного каналу з метою подальшого аналізу і співставлення. Така функція дає можливість користувачу відобразити інтенсивність вібрацій в реальному часі, а також перегляд вмісту записаних раніше файлів.

5. Отримані результати дають змогу стверджувати, що система працює правильно та коректно. Проведений аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати, що найбільший пік амплітуди віброприскорення припадає на вісь Y і є у діапазоні частот від 10 до 40 Гц. Оскільки експеримент проводився при вібраціях на частоті 20 Гц, то отриманий результат спектрального аналізу є достатньо достовірним.

## References

- [1] Серіков, Я. О., Таланін, Д. С., & Серіков, С. Я. (2013). Інформаційні технології у вирішенні завдань забезпечення безпеки життєдіяльності людини, ергономіки, охорони праці і навколишнього середовища : монографія: у 2-х ч.
- [2] Системи моніторингу і контролю вібрацій <http://www.omative.com/КонтрольВибрации.html>
- [3] <https://repo.knmu.edu.ua/bitstream/>
- [4] Iwaniec, M., Holovaty, A., Teslyuk, V., Lobur, M., Kolesnyk, K., & Mashevska, M. (2017). Development of vibration spectrum analyzer using the Raspberry Pi microcomputer and 3-axis digital MEMS accelerometer ADXL345. In 2017 XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). (pp. 25–29). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2017.7937525>



- [5] Hjort, A., & Holmberg, M. (2015). Measuring Mechanical Vibrations using Arduino as a slave I/O to an EPICS Control System.
- [6] Holovaty, A., Teslyuk, V., Iwaniec, M., & Mashevska, M. (2017). Development of a system for monitoring vibration accelerations based on the raspberry pi microcomputer and the adxl345 accelerometer. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 6(9), 52–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116082>
- [7] Griffin, M. J. (2004). Minimum health and safety requirements for workers exposed to hand-transmitted vibration and whole-body vibration in the European Union; a review. *Occupational and Environmental Medicine*, 61(5), 387–397. <https://doi.org/10.1136/oem.2002.006304>
- [8] Raã, G., & Raã, M. (2014). System for Monitoring and Analysis of Vibrations at Electric Motors. *Intern. Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 21(3), 97–104.
- [9] Лезновський, О. А. (2020). Розробка програмно-апаратної системи вібродіагностики промислового обладнання. Клієнтська частина.
- [10] Ніконов, М. С., Борзенков, І. І., & Лебединський, І. Л. (2021). Розробка виміральної системи та програмного проєкту для збору та аналізу параметрів якості електроенергії. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*, (1 (2)), 86–90.
- [11] Milovančević, M., Veg, A., Makedonski, A., & Marinović, J. S. (2014). Embedded systems for vibration monitoring. *Facta Universitatis, series: Mechanical Engineering*, 12(2), 171–181.
- [12] Rocha, S. M. S., Feiteira, J. F. S., Mendes, P. S. N., Da Silva, U. P. B., & Pereira, R. F. (2016). Method to Measure Displacement and Velocity from Acceleration Signals. *Intern. Journal of Engineering Research and Applications*, 6(6), 52–59.
- [13] Sekiya, H., Kimura, K., & Miki, C. (2016). Technique for determining bridge displacement response using MEMS accelerometers. *Sensors*, 16(2), 257. <https://doi.org/10.3390/s16020257>
- [14] Теслюк, В., Зелінський, А., Каркульовський, В., & Василюк, Я. Розширене проєктування мікросистемних пристроїв.
- [15] 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>
- [16] Albarbar, A., Mekid, S., Starr, A., & Pietruszkiewicz, R. (2008). Suitability of MEMS accelerometers for condition monitoring: An experimental study. *Sensors*, 8(2), 784–799. <https://doi.org/10.3390/s8020784>
- [17] Hjort, A., & Holmberg, M. (2015). Measuring Mechanical Vibrations using Arduino as a slave I/O to an EPICS Control System.
- [18] Мороз, В., Ройзман, В., Яновицький, О., Мішан, В. (2018). Визначення ефективності використання безрезонансного кріпильного присьрою. *Склад організаційно-програмного комітету сімнадцятої МНТК ВОТТТ*, 18, 262.
- [19] Chaudhury, S. B., Sengupta, M., & Mukherjee, K. (2014). Vibration monitoring of rotating machines using MEMS accelerometer. *International journal of scientific engineering and research*, 2(9), 5–11.
- [20] Prots'ko, I. H. O. R., & Teslyuk, V. A. S. Y. L. (2014). Algorithm of efficient computation DSTI-IV using cyclic convolutions. *Wseas transactions on signal processing*, 10(1), 277–287.
- [21] Бібліотека wiringPi для Raspberry Pi. <http://wiringpi.com/reference/i2-c-library/>
- [22] Бібліотека ДПФ FFTW. <http://www.fftw.org/>
- [23] eLa Torre, R. D., Pasobillo, G. A. E., Rebuena, M. F., Suñga, D. P., Esguerra, B. J. J., & Concepcion, R. (2020). Vibration-based Structural Health Monitoring System for Bridges using ADXL345 Accelerometer with MATLAB Standalone Application. In 2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HNICEM51456.2020.9400068>
- [24] Hasibuzzaman, M., Shufian, A., Shefa, R. K., Raihan, R., Ghosh, J., & Sarker, A. (2020). Vibration measurement & analysis using arduino based accelerometer. *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*. (pp. 508–512). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TENSYP50017.2020.9230668>
- [25] Adli, B., & Rusmin, P. H. (2020). Vibration Measuring Tools For Rotary Pumping Machine With Accelerometer MEMS Sensor. *2020 FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*, (pp. 69–74). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FORTEI-ICEE50915.2020.9249860>
- [26] Apriyansa, A., Bintoro, J., & Sandi, E. (2021). Development of Early Real-Time Disaster Mitigation Warning System Landslide with Gyroscope ADXL345 Sensor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1, 012080. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2019/1/012080>
- [27] Pramudya, Y., & Islamiah, M. (2019). Vibration characteristics study on observatory using accelerometer ADXL345 sensor and Arduino. *AIP Conference Proceedings*, 1, 030008. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.5132658>

**V. M. Teslyuk, N. S. Ripak, A. I. Holovaty, Y. V. Opytyak, T. V. Teslyuk**

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

## **HARDWARE AND SOFTWARE PROVISION OF THE VIBRATION ACCELERATION SPECTRUM MONITORING SYSTEM**

Among all types of mechanical influences, vibration is the most dangerous for technical objects. Alternating stresses caused by vibration contribute to the accumulation of damage in materials, system design, and failure. The destruction of the object occurs quite quickly under vibrational influences under the conditions of resonance, at the same time, vibration causes a violation of the physiological and functional states of a person. The impact of vibration on a person depends on its spectral composition, direction of action, duration of exposure, as well as on the individual characteristics of the person.

The structure of the vibration acceleration spectrum monitoring system was developed, which is based on the modular principle and includes a microcontroller, an accelerometer, a liquid crystal graphic color display, flash memory, and a microcomputer monitor. Algorithms of the vibration acceleration spectrum monitoring system were developed, including the accelerometer calibration algorithm, the dynamic acceleration measurement algorithm, and the fast Fourier transformation algorithm. The I<sup>2</sup>C interface for data exchange between the ADXL345 accelerometer and the Raspberry Pi 3 Model B microcomputer is defined. The software that processes the input information from several accelerometers

connected to the Raspberry Pi, which enables multi-channel measurements and their analysis, is developed. The results of testing the built system are given which make it possible to assert the correctness and correctness of the functioning of the developed system.

The article includes an introduction, an analysis of literary sources with a statement of the researched problem, in the section “Development of the structure and information support of the system for monitoring the spectrum of vibration accelerations” the developed structure of the system and the features of its hardware implementation are given. The hardware implementation was based on the use of inexpensive components to ensure a low price of the technological solution. In addition, in this section, I2C is selected for the implementation of data exchange between the components of the vibration spectrum monitoring system. The section “Algorithmic support of the designed system” describes the main steps of the algorithm. The section “Development of the vibration acceleration monitoring system software” includes information about the developed structure of the software and a brief description of a specific component. The results of testing the developed system are given in the section “Obtained results and their analysis”. The main results of the conducted research are formulated in the conclusions.

**Keywords:** system for monitoring and analyzing the vibration acceleration spectrum, vibration acceleration; spectral analysis, hardware and software, discrete Fourier transform, ADXL345, Raspberry Pi 3.

---

**Інформація про авторів:**

**Теслюк Василь Миколайович**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих систем управління.

Email: vasyli.m.teslyuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-5974-9310>

**Ріпак Назарій Степанович**, канд. техн. наук, ст. викладач, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: nazariy.s.ripak@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1184-990X>

**Головатий Андрій Ігорович**, канд. техн. наук, доцент кафедри систем автоматизованого проектування.

Email: andrii.i.holovaty@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-6143-648X>

**Опотяк Юрій Володимирович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: yurii.v.opotyak@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-9889-4177>

**Теслюк Тарас Васильович**, канд. техн. наук, асистент кафедри інформаційних систем та мереж.

Email: taras.v.tesliuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-6585-3715>

**Цитування за ДСТУ:** Теслюк В. М., Ріпак Н. С., Головатий А. І., Опотяк Ю. В., Теслюк Т. В. Апаратне та програмне забезпечення системи моніторингу спектру віброприскорень. *Український журнал інформаційних технологій*. 2023. Т. 5, № 1. С. 51–60.

**Citation APA:** Teslyuk, V. M., Ripak, N. S., Holovaty, A. I., Opotyak, Y. V., Teslyuk, T. V. (2023). Hardware and software provision of the vibration acceleration spectrum monitoring system. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 5(1), 51–60.

<https://doi.org/10.23939/ujit2023.01.051>