

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра електронних систем

СТРИЖОВЕЦЬ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ  
ВІБРАЦІЙ З FFT-ОБРОБКОЮ СИГНАЛУ

Спеціальність 171 Електроніка  
Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота  
на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:  
Пап О. В.  
канд. фіз.-мат наук,  
доцент кафедри ЕС

Реєстрація \_\_\_\_\_

(номер)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р. \_\_\_\_\_

(підпис)

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Тарас ЗАЯЦЬ

(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
Інженерно-технічний факультет  
Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. \_\_\_\_\_ (Заяць Т. М.)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему:

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ

ВІБРАЦІЙ З FFT-ОБРОБКОЮ СИГНАЛУ

Студента групи ЕС: Олександр СТРИЖОВЕЦЬ

( )

Керівник: к.ф.-м.н., кафедри ЕС

( )

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. \_\_\_\_\_ (Заяць Т. М.)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 року

### РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота на тему «Мікроконтролерна система аналізу вібрацій з FFT-обробкою сигналу» / Ужгородський національний університет, інженерно-технічний факультет, спеціальність 171 «Електроніка»; науковий керівник: **Папп О. В.**; студент: **Стрижовець О. О.**, група ЕС.

Пояснювальна записка: 47 сторінки, 6 рисунків, 11 таблиць, 20 джерел.

Об'єкт розробки – мікроконтролерна система реєстрації та цифрової обробки вібраційних сигналів.

Предмет розробки – апаратні та програмні засоби побудови системи аналізу вібрацій на основі цифрового акселерометра ADXL363, мікроконтролера STM32F405VGT6 та алгоритмів спектральної обробки на базі швидкого перетворення Фур'є.

Методи дослідження – аналіз існуючих систем вібродіагностики, синтез структурної та принципової схем мікроконтролерного пристрою, розрахунок основних електричних параметрів, а також комп'ютерне моделювання роботи вузлів і алгоритмів спектральної обробки.

У процесі виконання роботи проведено пошук і аналіз аналогів цифрових систем вимірювання вібрацій. На основі вимог технічного завдання розроблено структурну та принципову схеми мікроконтролерної системи аналізу вібрацій з використанням акселерометра ADXL363 та мікроконтролера STM32F405VGT6. У проектній частині виконано опис роботи пристрою, розрахунок підсистем живлення, тактування, інтерфейсу SPI та параметрів FFT-аналізу, а також модельну перевірку алгоритмів спектральної обробки вібросигналів.

Ключові слова: мікроконтролерна система аналізу вібрацій, цифровий акселерометр, ADXL363, STM32F405, швидке перетворення Фур'є, FFT, спектральний аналіз, бібліотека CMSIS-DSP, інтерфейс SPI, вібраційна діагностика.

### ABSTRACT

Bachelor's qualification work on the topic "Microcontroller Vibration Analysis System with FFT Signal Processing" / Uzhhorod National University, Faculty of Engineering, specialty 171 Electronics; Supervisor: **O. V. Papp**; Student: **O. O. Stryzhivets**, group ES.

Explanatory note: 47 pages, 6 figures, 11 tables, 20 references.

Object of development is a microcontroller-based system for acquisition and digital processing of vibration signals.

Subject of research is the hardware and software implementation of a vibration analysis system using the ADXL363 digital accelerometer, STM32F405 microcontroller and FFT-based spectral analysis algorithms.

Research methods include analysis of existing vibration monitoring systems, synthesis of structural and circuit diagrams of the microcontroller device, calculation of the main electrical parameters, and computer simulation of the operation of hardware units and spectral signal processing algorithms.

During the work, a survey and analysis of existing vibration analysis systems were carried out. Based on the technical requirements, structural and circuit diagrams of a microcontroller vibration analysis system using the ADXL363 accelerometer and STM32F405 microcontroller were developed. The design part includes the synthesis of block and circuit diagrams, description of the device operation, calculation of the power supply, clocking and SPI interface subsystems, as well as model verification of the FFT-based vibration signal processing algorithms.

Keywords: microcontroller vibration analysis system, digital accelerometer, ADXL363, STM32F405, FFT, spectral analysis, CMSIS-DSP, SPI interface, vibration diagnostics.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Факультет: Інженерно-технічний

Кафедра: Електронних систем

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Зав. кафедри ЕС ІТФ УжНУ,

доц. \_\_\_\_\_ (Заяць Т. М.)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

## **ЗАВДАННЯ**

**на кваліфікаційну бакалаврську роботу**

**студенту Стрижовцю Олександрю Олександровичу**

### **1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи:**

«Мікроконтролерна система аналізу вібрацій з FFT-обробкою сигналу».

Затверджена Розпорядженням декана ІТФ

від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 року

№ \_\_\_\_\_

### **2. Термін закінчення студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи:**

20 червня 2026 року.

### **3. Вихідні дані до бакалаврської роботи:**

Об'єкт контролю: обертове технологічне обладнання — електродвигуни, насосні агрегати, вентилятори та компресори з частотою обертання до 3000 об/хв і характерними вібраційними частотами до 200 Гц.

Первинний перетворювач: тривісний цифровий MEMS-акселерометр ADXL363 (Analog Devices) з вбудованим 12-бітним АЦП та інтерфейсом SPI, вихідна частота даних ODR = 400 Гц.

Обчислювальна платформа: мікроконтролер STM32F405VGT6 на ядрі ARM Cortex-M4F з апаратним блоком FPU, тактова частота 168 МГц, обсяг RAM 192 КБ, вбудовані інтерфейси SPI та USB 2.0 OTG FS.

Параметри цифрової обробки: частота дискретизації  $F_s = 400$  Гц; розмір вікна FFT  $N = 1024$  відліки; частотна роздільна здатність  $\Delta f \approx 0,39$  Гц; час накопичення одного вікна  $T = 2,56$  с; вагова функція — вікно Hann; бібліотека FFT — CMSIS-DSP (arm\_rfft\_fast\_f32).

Живлення: вхідна напруга 5 В (USB або зовнішній блок живлення); стабілізатор AMS1117-3.3 формує напругу 3,3 В для живлення мікроконтролера та акселерометра.

Інтерфейс обміну з ПК: USB 2.0 OTG FS (роз'єм micro-USB Type B).

#### **4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):**

Вступ.

1. Огляд та аналіз аналогів об'єкта проектування.
2. Проектно-конструкторський розділ.
3. Висновки.
4. Список використаних джерел.

#### **5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):**

1. Структурна схема.
2. Принципова електрична схема.

#### **6. Консультанти розділів роботи:**

Розділ	Консультант	Підпис, дата — завдання видав	Підпис, дата — завдання прийняв
1, 2		Доц. Заяць Т.М.	Стрижовець О.А.
Н. контроль	Папп О.В.		

7. Дата видачі завдання: « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Папп О.В.

Завдання прийняв на виконання \_\_\_\_\_ Стрижовець О.О.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання КБР	Термін виконання етапів	Примітки
1	Пошук та аналіз аналогів об'єкта досліджень	до 20.12.2025 року	
2	Огляд та аналіз аналогів	до 20.02.2026 року	
3	Вибір технічного рішення та обґрунтування технічної пропозиції	до 20.03.2026 року	
4	Синтез структурної та принципової схем, їх розрахунок	до 20.04.2026 року	
5	Виготовлення конструкторської документації	до 20.05.2026 року	
6	Оформлення кваліфікаційної бакалаврської роботи	до 10.06.2026 року	
7	Захист на державній екзаменаційній комісії	Згідно з графіком захисту	

Студент \_\_\_\_\_ (Стрижовець О.О.)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ (Папп О.В.)

## Зміст

<b>ВСТУП .....</b>	<b>10</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ .....</b>	<b>14</b>
1.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВІБРАЦІЙНУ ДІАГНОСТИКУ .....	14
1.2 МЕТОДИ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ .....	15
1.3 ТИПИ ДАТЧИКІВ ВІБРАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ MEMS-АКСЕЛЕРОМЕТРА.....	16
1.4 ДИСКРЕТИЗАЦІЯ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ І ТЕОРЕМА НАЙКВІСТА–ШЕННОНА.....	17
1.5 ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є У ВІБРОДІАГНОСТИЦІ ...	18
1.6 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ.....	19
<b>РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА – АПАРАТНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ .....</b>	<b>21</b>
2.1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ .....	21
2.2 ОПИС СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ.....	22
2.3 ОПИС ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО МОДУЛЯ STM32F405.....	23
2.4 ОПИС ПІДСИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЙ НА ОСНОВІ ADXL363 .....	26
2.5 ПІДСИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ, ТАКТУВАННЯ ТА ІНТЕРФЕЙСІВ ПІДКЛЮЧЕННЯ .....	27
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ.....</b>	<b>30</b>
3.1 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ І FFT-АНАЛІЗУ .....	30
3.2 ОЦІНКА ШВИДКОДІЇ МІКРОКОНТРОЛЕРА STM32F405 ПРИ ВИКОНАННІ FFT .....	31
3.3 РОЗРАХУНОК ПІДСИСТЕМИ ТАКТУВАННЯ: ДЕТАЛЬНИЙ ОПИС PLL .....	32
3.4 РОЗРАХУНОК ПІДСИСТЕМИ ТАКТУВАННЯ: КВАРЦ І НАВАНТАЖУВАЛЬНІ КОНДЕНСАТОРИ .....	35
3.5 РОЗРАХУНОК ПІДСИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ТА ЕЛЕМЕНТІВ РОЗВ'ЯЗКИ .....	35
3.6 ДЕТАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕННЯ ІНТЕРФЕЙСУ SPI ДЛЯ ТРЬОХ ОСЕЙ ADXL363.....	36
3.7 МОДЕЛЬНИЙ ПРИКЛАД ОБРОБКИ ВІБРАЦІЙНОГО СИГНАЛУ МЕТОДОМ FFT.....	39
3.8 АЛГОРИТМ РОБОТИ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ .....	41
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>44</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>46</b>

					<i>КРБ.ЕС.10428527.001.ПЗ</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Літера	<b>МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ З FFT-ОБРОБКОЮ СИГНАЛУ</b>	Н	Аркуш	Аркушів
Розробив	Стрижовець						9	49
Перевір.	Панн О.В			<i>УжНУ, ІТФ, гр.ЕС, 4-курс</i>				
Н.Контр	Панн О.В							
Затв.	Панн О.В							

## ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку промисловості та впровадження концепції Industry 4.0 висувають підвищені вимоги до надійності, енергоефективності та безперервності роботи технологічного обладнання. Значна частина відмов машин і механізмів пов'язана з поступовим зростанням рівня вібрацій, що супроводжує дисбаланс ротора, розцентровку валів, знос підшипників кочення, люфти та інші дефекти обертових вузлів. Вібраційна діагностика дає змогу виявляти такі дефекти на ранніх стадіях за зміною параметрів коливальних процесів, що істотно знижує ризик аварійних зупинок та непродуктивних втрат часу й ресурсів.

Традиційні системи вібраційного аналізу часто базуються на дорогих переносних аналізаторах або стаціонарних багатоканальних вимірювальних комплексах. Такі рішення мають значну вартість, складні в налаштуванні та експлуатації, потребують участі кваліфікованого персоналу й не завжди придатні для розгортання на великій кількості об'єктів контролю, особливо на малих і середніх підприємствах. Розвиток мікроелектроніки, поява малопотужних 32-розрядних мікроконтролерів із апаратною підтримкою операцій з плаваючою комою та поширення тривісних MEMS-акселерометрів, таких як ADXL363, створюють передумови для реалізації компактних вбудованих систем вібраційної діагностики, здатних виконувати спектральний аналіз безпосередньо на об'єкті контролю.

Особливу актуальність має застосування швидкого перетворення Фур'є (FFT) у мікроконтролерних системах, оскільки характерні частоти дефектів – основні гармоніки, побічні смуги, резонансні піки – найбільш наочно проявляються в спектральній області. Мікроконтролер STM32F405 з ядром ARM Cortex-M4 та апаратним блоком FPU у поєднанні з тривісним MEMS-акселерометром ADXL363 дає змогу реалізувати мікроконтролерну систему аналізу вібрацій, здатну виконувати FFT-обробку у режимі, близькому до реального часу, та формувати діагностичні ознаки стану обладнання для подальшої інтеграції у системи моніторингу або промислові IoT-платформи.

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					10
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою роботи є розроблення та дослідження мікроконтролерної системи аналізу вібрацій з FFT-обробкою сигналу на базі мікроконтролера STM32F405 та тривісного MEMS-акселерометра ADXL363 для використання у вібраційній діагностиці технологічного обладнання.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовано та розв'язано такі завдання дослідження:

1. Виконати аналіз існуючих методів вібраційної діагностики та засобів вимірювання вібрацій, а також вимог до частотного діапазону, точності та швидкодії систем моніторингу.
2. Обґрунтувати вибір акселерометра ADXL363 та мікроконтролера STM32F405, проаналізувати їхні основні електричні та функціональні характеристики за даними офіційних даташитів.
3. Розробити структурну схему мікроконтролерної системи аналізу вібрацій та визначити склад її основних функціональних вузлів.
4. Розробити принципову електричну схему пристрою, включно з підсистемами живлення, тактування, підключенням акселерометра ADXL363 та інтерфейсами передавання даних.
5. Виконати розрахунок параметрів дискретизації, вікна FFT, конфігурації PLL мікроконтролера, елементів підсистеми живлення та розв'язки, а також оцінити навантаження інтерфейсу SPI при зчитуванні даних з трьох осей акселерометра.
6. Розробити алгоритми збору даних з акселерометра, віконної обробки та спектрального аналізу на основі FFT та виконати їх **модельну перевірку** із використанням бібліотеки CMSIS-DSP для мікроконтролерів STM32.
7. Провести модельні дослідження та оцінити працездатність системи на тестових вібраційних сигналах, проаналізувати отримані спектри та сформулювати висновки щодо ефективності запропонованого рішення.

Об'єктом дослідження є процес вібраційної діагностики обертового технологічного обладнання із застосуванням вбудованих мікроконтролерних засобів вимірювання та цифрової обробки сигналів.

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					11
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Предметом дослідження є мікроконтролерна система аналізу вібрацій з FFT-обробкою сигналу, зокрема її схемотехнічні рішення, параметри дискретизації та спектральної обробки, алгоритми роботи підсистеми збору й обробки даних, а також характеристичні показники точності та швидкодії при діагностиці дефектів за вібраційними ознаками.

У роботі застосовуються аналітичні методи теорії сигналів і систем для обґрунтування вибору параметрів дискретизації, частотної роздільної здатності та віконної обробки вібраційних сигналів; методи комп'ютерного моделювання для дослідження часових і частотних характеристик сигналів та перевірки алгоритмів FFT-аналізу. Для розрахунку та перевірки електричних параметрів використовуються дані офіційної технічної документації виробників компонентів.

Практична цінність роботи полягає у розробленні компактної, енергоефективної та відносно недорогої мікроконтролерної системи вібраційного аналізу, придатної для інтеграції у системи моніторингу технічного стану промислового обладнання, а також використання у лабораторних та навчальних стендах. Використання доступних компонентів – мікроконтролера STM32F405, акселерометра ADXL363 та стандартних елементів живлення й розв'язки – спрощує тиражування пристрою і створює можливості для його подальшої модернізації, зокрема шляхом додавання бездротових інтерфейсів, збереження даних та розширених алгоритмів діагностики.

Структурно бакалаврська кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. У першому розділі наведено огляд методів вібраційної діагностики, теоретичні основи спектрального аналізу та характеристику основних типів датчиків вібрації, включаючи MEMS-акселерометри. У другому розділі представлено проєктну частину: аналіз технічного завдання, опис структурної схеми, детальний розгляд принципової електричної схеми мікроконтролерного модуля STM32F405, підсистеми вимірювання вібрацій на базі ADXL363, а також підсистеми живлення, тактування та інтерфейсів підключення. Третій розділ присвячено розрахункам параметрів дискретизації та FFT-аналізу, оцінці швидкодії мікроконтролера, детальному опису

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

налаштування PLL, підсистеми живлення й інтерфейсу SPI, а також модельному прикладу обробки вібраційного сигналу. Загальний обсяг роботи становить **47 сторінок** друкованого тексту.

	<i>Виконав</i>				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
	<i>Керівник</i>					
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>13</i>

# РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

## 1.1 Загальні відомості про вібраційну діагностику

Вібраційна діагностика є одним із основних методів технічного діагностування стану машин та механізмів, що широко застосовується у системах технічного обслуговування за станом. В основі цього методу лежить положення про те, що більшість дефектів обертового та поступального обладнання супроводжується зміною параметрів коливальних процесів, які можуть бути виміряні та проаналізовані. До типових об'єктів вібраційного контролю належать електродвигуни, насоси, вентилятори, компресори, редуктори та інше промислове обладнання. Допустимі рівні вібрації та критерії оцінювання технічного стану обертового обладнання регламентуються міжнародними стандартами серії ISO 20816 (раніше — ISO 10816), що визначають смуги частот вимірювання та граничні значення віброшвидкості для різних класів машин.

Вібросигнал, що реєструється на корпусі або у вузлових точках машини, містить інформацію про наявність дисбалансу, розцентрування, дефектів підшипників кочення, зносу зубчастих передач, розхитування кріплень та інших несправностей. Кожен із зазначених дефектів формує характерний частотно-часовий «почерк» вібрацій, який може бути виділений за допомогою відповідних методів обробки сигналів. Використання вібраційної діагностики дає змогу зменшити кількість аварійних відмов, підвищити коефіцієнт готовності обладнання та оптимізувати графіки планово-попереджувальних ремонтів.

Процес вібраційної діагностики включає декілька послідовних етапів: вимірювання вібрацій за допомогою чутливих датчиків, перетворення аналогового сигналу в цифрову форму, попередню обробку, спектральний або час–частотний аналіз та інтерпретацію результатів. У сучасних системах значна частина цих етапів виконується у режимі, близькому до реального часу, із застосуванням мікроконтролерів, цифрових сигнальних процесорів або спеціалізованих аналого-цифрових приладів.

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

## 1.2 Методи аналізу вібраційних сигналів

Аналіз у часовій області базується на безпосередньому дослідженні часової реалізації вібраційного сигналу. Оцінюються миттєві значення, форма сигналу та його статистичні характеристики: середньоквадратичне значення, середнє значення, пікова амплітуда, коефіцієнт піковості, асиметрія тощо. Часовий аналіз дає змогу виявити ударні процеси, значні зміни режиму роботи, наявність перехідних процесів, а також грубо оцінити рівень вібрацій щодо встановлених нормативів.

Недоліком виключно часових методів є обмежена можливість розрізнення окремих частотних складових сигналу. За наявності кількох одночасних дефектів їх вплив на часову реалізацію може накладатися, що ускладнює інтерпретацію результатів. У зв'язку з цим часовий аналіз доцільно поєднувати з аналізом у частотній області.

Аналіз у частотній області передбачає перехід від часової реалізації вібросигналу до його спектрального представлення. Основним інструментом такого переходу у цифрових системах є дискретне перетворення Фур'є та його ефективні алгоритми обчислення – швидке перетворення Фур'є (FFT). У результаті обробки формується амплітудно-частотний спектр, у якому дефекти проявляються у вигляді піків на характерних частотах.

Наприклад, дисбаланс ротора зазвичай призводить до збільшення амплітуди основної гармоніки на частоті обертання, розцентрування – до зростання другої гармоніки, а дефекти підшипників кочення – до появи спектральних складових на частотах, що обчислюються за геометричними параметрами підшипника та частотою обертання. Використання частотного аналізу дає змогу чітко виділяти окремі фізичні процеси, навіть якщо вони накладаються в часі.

Для аналізу нестационарних та імпульсних процесів, характерних для перехідних режимів або зародження дефектів, застосовуються методи час–частотного аналізу. До таких методів належать короткочасне перетворення Фур'є (STFT) та вейвлет-перетворення, які формують двовимірне представлення сигналу – залежність енергетичних складових від часу і частоти одночасно. Такі методи дозволяють

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

відслідковувати зміну спектрального складу сигналу в часі, однак потребують більших обчислювальних ресурсів, ніж класичний частотний аналіз.

У межах цієї кваліфікаційної роботи основним методом обробки обрано спектральний аналіз на основі FFT, який забезпечує прийнятний компроміс між інформативністю результатів та обчислювальною складністю для мікроконтролерної реалізації.

### **1.3 Типи датчиків вібрації та обґрунтування вибору MEMS-акселерометра**

Акселерометри вимірюють прискорення вібрацій та є найбільш поширеним типом сенсорів у вібродіагностиці. За фізичним принципом дії акселерометри поділяють на п'єзоелектричні, п'єзореzystивні та мікроелектромеханічні (MEMS). П'єзоелектричні акселерометри забезпечують високий динамічний діапазон і широкий робочий частотний діапазон, тому традиційно застосовуються у промислових переносних аналізаторах вібрацій. П'єзореzystивні акселерометри доцільні при низьких частотах та великих амплітудах переміщень, зокрема у транспортній техніці.

MEMS-акселерометри реалізуються на основі мікроелектромеханічних структур на кристалі кремнію та відрізняються малими габаритами, низьким енергоспоживанням і можливістю інтеграції додаткових функцій, таких як вбудовані фільтри, аналого-цифрові перетворювачі та цифрові інтерфейси. Такі сенсори особливо придатні для вбудованих та бездротових систем моніторингу, де критичними є енергоспоживання та розміри.

Датчики швидкості формують вихідний сигнал, пропорційний швидкості коливань контрольованого об'єкта. Класичні конструкції реалізуються на основі електромагнітної індукції та містять масу, пружний елемент та котушку в магнітному полі. Датчики швидкості традиційно застосовуються для контролю стану великих машин, де рівні вібрацій відносно високі, а робочі частоти не перевищують декількох кілогерц.

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Датчики переміщення (proximity-датчики) вимірюють відносно зміщення вала відносно підшипникової опори. Найбільш поширеними є вихроструміві безконтактні датчики, що формують сигнал, пропорційний зазору між чутливим елементом та провідниковою поверхнею. Такі сенсори доцільно застосовувати у високошвидкісних роторах, де важливо контролювати орбіту руху вала та уникати небезпечних резонансних режимів.

У розроблюваній мікроконтролерній системі аналізу вібрацій як первинний перетворювач обрано тривісний MEMS-акселерометр ADXL363 виробництва Analog Devices з вбудованим 12-бітним аналого-цифровим перетворювачем та цифровим інтерфейсом SPI. Такий вибір обумовлено такими чинниками:

- достатній частотний діапазон для задач низько- та середньочастотної вібродіагностики;
- низьке енергоспоживання (типовий струм у режимі вимірювання – менше 2 мА);
- наявність інтегрованого 12-бітного АЦП та інтерфейсу SPI, що спрощує підключення до мікроконтролера;
- можливість одночасного вимірювання прискорення по трьох взаємно перпендикулярних осях, що підвищує інформативність діагностики.

#### 1.4 Дискретизація вібраційних сигналів і теорема Найквіста–Шеннона

У цифрових системах аналізу вібрацій безперервний у часі сигнал, сформований датчиком, перетворюється в послідовність дискретних відліків за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Ключовим параметром такого перетворення є частота дискретизації  $F_s$ , що визначає максимальну відтворювану частоту та часову роздільну здатність.

Для коректної цифрової обробки вібросигналу частота дискретизації обирається виходячи з верхньої межі його спектра. Як відомо з теорії цифрової обробки сигналів, відновити вихідний смугообмежений сигнал без втрат вдається лише тоді, коли крок вибірки забезпечує щонайменше два відліки на період найвищої складової. Це умова виражається відомим співвідношенням  $F_{max}$ . Це співвідношення задається нерівністю:

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

$$F_s \geq 2F_{\max}. \quad (1.1)$$

де  $F_s$  – частота дискретизації, Гц;  $F_{\max}$  – максимальна значуща частотна складова вібросигналу, Гц. Порушення цієї умови призводить до того, що складові з частотами вище половини частоти дискретизації «дзеркаляться» у робочий діапазон і помилково інтерпретуються алгоритмом як реальні діагностичні ознаки (ефект накладання спектрів, або аліасинг). Саме тому частоту дискретизації узгоджено з полозою пропускання цифрового фільтра акселерометра ADXL363.

При спектральному аналізі важливим є також поняття частотної роздільної здатності. Для вибірки довжиною  $N$  відліків, обробленої за допомогою FFT, частотна роздільна здатність визначається формулою:

$$\Delta f = \frac{F_s}{N}. \quad (1.2)$$

де  $\Delta f$  – крок по осі частоти, Гц;  $F_s$  – частота дискретизації, Гц;  $N$  – кількість відліків у вікні обробки. Збільшення  $N$  покращує розрізнення близько розташованих частотних складових, проте потребує більшого обсягу оперативної пам'яті та збільшує час обчислення FFT.

Для зменшення ефекту спектральних витікань, які виникають через скінченну тривалість вибірки, перед обчисленням FFT до сигналу застосовують віконні функції (Hann, Hamming, Blackman тощо). Вибір конкретного вікна впливає на співвідношення між шириною головної пелюстки спектральної характеристики та рівнем бічних пелюсток і має враховуватися при проектуванні алгоритмів обробки.

### 1.5 Основи застосування швидкого перетворення Фур'є у вібродіагностиці

Швидке перетворення Фур'є є сукупністю алгоритмів ефективного обчислення дискретного перетворення Фур'є. Класичне дискретне перетворення Фур'є для послідовності з  $N$  відліків визначається співвідношенням:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N}, k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (1.3)$$

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

де  $x[n]$  – значення вхідного сигналу у часовій області;  $X[k]$  – комплексні спектральні коефіцієнти;  $N$  – кількість відліків у вікні обробки. Пряме обчислення цього виразу потребує порядку  $N^2$  операцій, що є надмірним для реалізації у мікроконтролерних системах при великих  $N$ .

Алгоритми FFT дозволяють зменшити кількість операцій до порядку  $N \log_2 N$  шляхом декомпозиції вихідного перетворення на послідовність перетворень меншого розміру. Реалізація таких алгоритмів широко підтримується у бібліотеках цифрової обробки сигналів, зокрема в бібліотеці CMSIS-DSP для мікроконтролерів на ядрі ARM Cortex-M. У межах даної роботи передбачається програмна реалізація FFT на мікроконтролері з плаваючою комою, що спрощує масштабування та інтерпретацію результатів.

Результатом застосування FFT до вібраційного сигналу є масив комплексних значень  $X[k]$ , з яких визначаються амплітуди та фази гармонічних складових. Амплітудний спектр подається у вигляді модуля комплексних коефіцієнтів, нормованого до кількості відліків та амплітуди вхідного сигналу. За формою спектра проводиться ідентифікація характерних частот, що відповідають дефектам, описаним у підрозділі 1.2.

### 1.6 Огляд існуючих систем аналізу вібрацій

Сучасні системи аналізу вібрацій умовно поділяються на аналогові та цифрові. Аналогові рішення історично базувалися на аналогових фільтрах та вимірювачах рівня вібрацій, що забезпечували лише інтегральні показники у вузьких смугах частот. Такі системи мали обмежені діагностичні можливості, оскільки не надавали повної інформації про спектр вібраційного сигналу.

Цифрові системи аналізу вібрацій реалізуються на основі персональних комп'ютерів, цифрових сигнальних процесорів або мікроконтролерів і виконують повний цикл обробки: дискретизацію сигналу, фільтрацію, спектральний та час–частотний аналіз, візуалізацію та архівування даних. До цієї групи належать переносні віброаналізатори, стаціонарні багатоканальні комплекси моніторингу та вбудовані вузли контролю стану, інтегровані безпосередньо в обладнання.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					19
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окремий напрямок становлять бездротові та автономні модулі моніторингу, що поєднують у собі MEMS-акселерометр, мікроконтролер із можливістю виконання FFT та засоби передачі даних (Industrial Ethernet, Wi-Fi, BLE тощо). Такі пристрої орієнтовані на роботу у розподілених системах промислового Інтернету речей (Industrial IoT).

	<i>Виконав</i>				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
	<i>Керівник</i>					
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>20</i>

## РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА – АПАРАТНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ

У попередньому розділі розглянуто теоретичні основи спектрального аналізу та обґрунтовано вибір тривісного MEMS-акселерометра. У цьому розділі на основі вимог технічного завдання синтезовано структурну та принципову схеми апаратної частини мікроконтролерної системи аналізу вібрацій.

### 2.1 Аналіз технічного завдання

Згідно з технічним завданням мікроконтролерна система аналізу вібрацій призначена для реєстрації вібраційних процесів на об'єкті контролю, подальшої цифрової обробки сигналів у частотній області та передачі результатів аналізу на зовнішній пристрій відображення. Система повинна забезпечувати вимірювання прискорення в трьох взаємно перпендикулярних осях, виконання спектрального аналізу методом швидкого перетворення Фур'є та формування діагностичних ознак стану обладнання.

Головними вимогами до системи є забезпечення визначеного частотного діапазону аналізу, належної частотної роздільної здатності, потрібної кількості вимірювальних каналів, а також відповідність апаратної частини умовам експлуатації. Частотний діапазон аналізу визначається характерними частотами дефектів об'єктів діагностики і, як правило, для загальнопромислового обладнання охоплює область від одиниць до кількох сотень герц. На основі цього діапазону обираються параметри дискретизації та налаштування вимірювального тракту.

До мікроконтролерної частини висуваються вимоги щодо достатньої обчислювальної потужності для виконання алгоритмів FFT, наявності необхідного обсягу оперативної пам'яті та підтримки інтерфейсів підключення датчиків вібрації. Як обчислювальна платформа використовується мікроконтролер STM32F405VGT6, побудований на ядрі ARM Cortex-M4 із плаваючою комою та максимальною тактовою частотою 168 МГц. Для вимірювання вібрацій застосовується тривісний MEMS-акселерометр ADXL363 з вбудованим 12-бітним аналого-цифровим перетворювачем та цифровим інтерфейсом SPI.

До допоміжних вузлів системи належать підсистема живлення, що формує стабілізовану напругу 3,3 В для живлення мікроконтролера та датчика, підсистема

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					21
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тактування мікроконтролера, а також інтерфейсні роз'єми для програмування, налагодження та обміну даними із зовнішніми пристроями. Конструктивно система реалізується у вигляді друкованої плати, яка може бути інтегрована до складу більш загального комплексу моніторингу вібрацій.

## 2.2 Опис структурної схеми мікроконтролерної системи

Структурна схема мікроконтролерної системи аналізу вібрацій подана на рисунку 2.1 (див. також Додаток А). Вона включає такі основні функціональні блоки: об'єкт контролю, датчик вібрації ADXL363, мікроконтролерний модуль STM32F405VGT6, інтерфейс підключення до зовнішніх пристроїв та блок живлення 3,3 В.

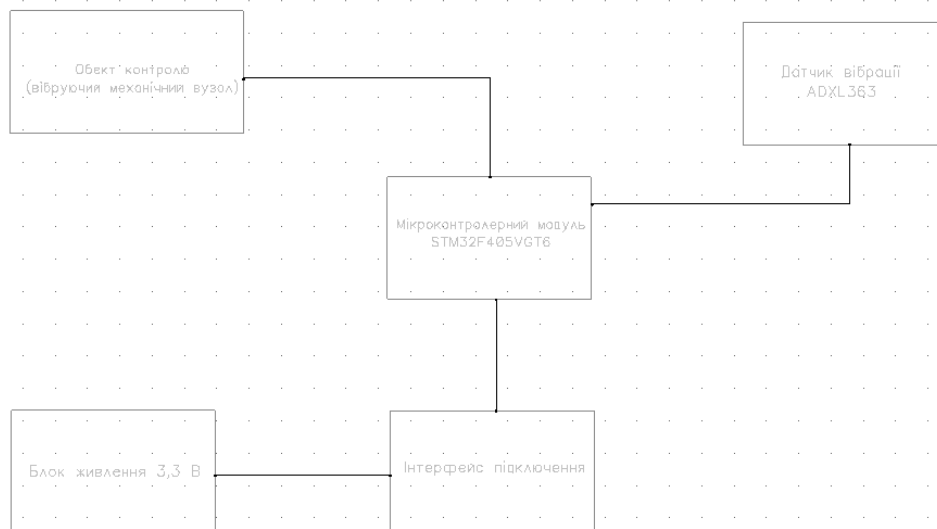


Рисунок 2.1 – Структурна схема мікроконтролерної системи аналізу вібрацій

Об'єкт дослідження (механічний вузол, що вібує) подано як умовний блок, на площині якого кріпиться датчик вібрації. Датчик ADXL363 трансформує механічні коливання в електричні сигнали прискорення за трьома вісями та видає їх у цифровому форматі через інтерфейс SPI. Мікроконтролерний пристрій виконує запит даних з датчика, збір вибірок в буферах оперативної пам'яті, проведення спектрального аналізу методом FFT та формування результатів у вигляді набору діагностичних ознак.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Інтерфейс підключення реалізовано через вбудований контролер USB 2.0 OTG FS мікроконтролера STM32F405VGT6. Сигнальні лінії диференційної пари USB (D+ та D-) виведені на роз'єм J1 (micro-USB Type-B), що використовується для з'єднання з персональним комп'ютером та одночасно як джерело живлення 5 В для підсистеми живлення пристрою. Для завантаження програмного забезпечення та налагодження передбачено роз'єм J2 (SWD, 2×5 pin), підключений до виводів SWDIO та SWDCLK мікроконтролера.

Блок живлення перетворює напругу зовнішнього джерела 5 В у стабілізовану напругу 3,3 В, яка використовується для живлення мікроконтролера STM32F405VGT6, акселерометра ADXL363 та допоміжних вузлів системи.

### **2.3 Опис принципової схеми мікроконтролерного модуля STM32F405**

Принципова електрична схема мікроконтролерного модуля реалізує конкретні схемотехнічні рішення, що відповідають функціональним блокам структурної схеми. Центральним елементом є мікроконтролер STM32F405VGT6 (U1) у корпусі LQFP-100, який містить 32-розрядне ядро ARM Cortex-M4 з плаваючою комою, до 1 МБ флеш-пам'яті програм та 192 КБ оперативної пам'яті даних. У схемі задіяні лінії живлення ядра та периферії, виводи тактування, сигнальні лінії інтерфейсу SPI, порти загального призначення та виводи інтерфейсів зв'язку.

	<i>Виконав</i>				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
	<i>Керівник</i>					
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>23</i>

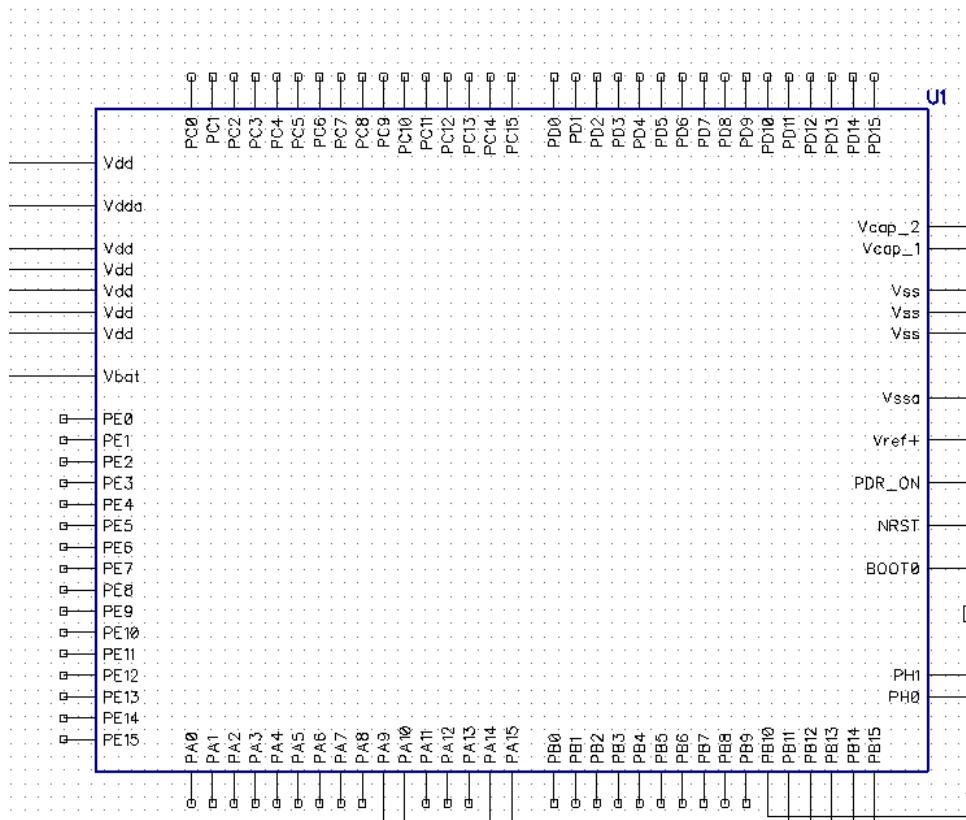


Рисунок 2.2 – Фрагмент принципової схеми мікроконтролерного модуля STM32F405 (повна принципова схема наведена в Додатку Б)

Живлення мікроконтролера здійснюється від шини 3,3 В, яка подається на відповідні виводи VDD. Для забезпечення стабільної роботи передбачено байпасні конденсатори ємністю 100 нФ, розташовані максимально близько до кожного виводу живлення, відповідно до рекомендацій виробника. Виводи заземлення VSS з'єднані із загальною шиною друкованої плати. Для живлення внутрішнього стабілізатора ядра використовуються виводи  $VCAP_1$  та  $VCAP_2$ , до кожного з яких підключено конденсатор ємністю 2,2 мкФ з низьким ESR (менше 100 мОм) відповідно до вимог документації.

Згідно з технічними даними STM32F405 типовий питомий струм споживання ядра у режимі Run при роботі з Flash-пам'яттю становить 238 мкА/МГц. Для тактової частоти 168 МГц орієнтовний струм ядра складає:

$$I_{CPU} = 238 \frac{\mu A}{MHz} \times 168 MHz \approx 40 mA, \quad (2.1)$$

а відповідна потужність:

$$P_{CPU} = U_{DD} \times I_{CPU} = 3,3V \times 0,040A \approx 132 мВт. \quad (2.2)$$

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					24
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримане значення відповідає нижній межі типового діапазону 130–180 мВт для режиму роботи CPU + основна периферія.

Орієнтовний розподіл струму споживання мікроконтролера наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Орієнтовне споживання струму вузлами мікроконтролера STM32F405VGT6

Складова	Орієнтовний струм
CPU @ 168 МГц, FFT, обробка даних	40–55 мА
DMA / SPI для акселерометра	1–7 мА
USB OTG FS активний	4–6 мА
GPIO, таймери, системні периферії	1–3 мА
<b>Разом MCU</b>	<b>≈ 50–70 мА</b>

Для розрахунку прийнято максимальне значення споживаного струму мікроконтролера  $I_{MCU} = 70$  мА як консервативна оцінка.

Орієнтовний сумарний струм споживання мікроконтролера від шини 3,3 В з урахуванням виконання FFT, роботи інтерфейсу SPI, USB OTG FS, таймерів і GPIO становить 50–70 мА. Відповідна потужність споживання оцінюється наступним чином:

$$P_{MCU} = 3,3\text{В} \times 0,070\text{А} = 231\text{мВт}, \quad (2.3)$$

що узгоджується з типовими характеристиками для STM32F405 та забезпечує резерв потужності у контурі живлення.

Живлення мікроконтролера забезпечується від зовнішнього кварцового генератора ZQ1 із номінальною частотою 8 МГц, з'єднаного з виводами  $OSC_{IN}$  та  $OSC_{OUT}$  мікроконтролера. Внутрішній блок генерації (RCC) налаштовується програмно за допомогою петлі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ, PLL), що дозволяє досягти операційної частоти ядра 168 МГц. До виводів кварцового генератора приєднано два навантажувальні конденсатори С4 ємністю по 33 пФ, підібрані

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

відповідно до параметрів генератора та вказівок виробника мікроконтролера (детальний розрахунок представлено у частині 3.4).

У схемі реалізовано інтерфейс програмування та налагодження на основі стандартного протоколу SWD, виводи якого (SWDIO та SWDCLK) підключені до роз'єму J2 (2×5 pin, 1,27 мм). Це дає змогу здійснювати завантаження програмного забезпечення, налагодження та моніторинг змінних під час роботи системи за допомогою стандартного програматора ST-Link.

## 2.4 Опис підсистеми вимірювання вібрацій на основі ADXL363

Підсистема вимірювання вібрацій реалізована на основі тривісного MEMS-акселерометра ADXL363 (U2) виробництва Analog Devices, який інтегрує сенсорні елементи, 12-бітний аналого-цифровий перетворювач та цифровий інтерфейс SPI в одному корпусі LGA-16. Датчик живиться від напруги 3,3 В і має окремі виводи живлення аналогової (VS) та цифрової ( $VDD_{I/O}$ ) частини, для яких у схемі передбачені фільтруючі конденсатори ємністю 100 нФ для зменшення рівня шумів та перешкод.

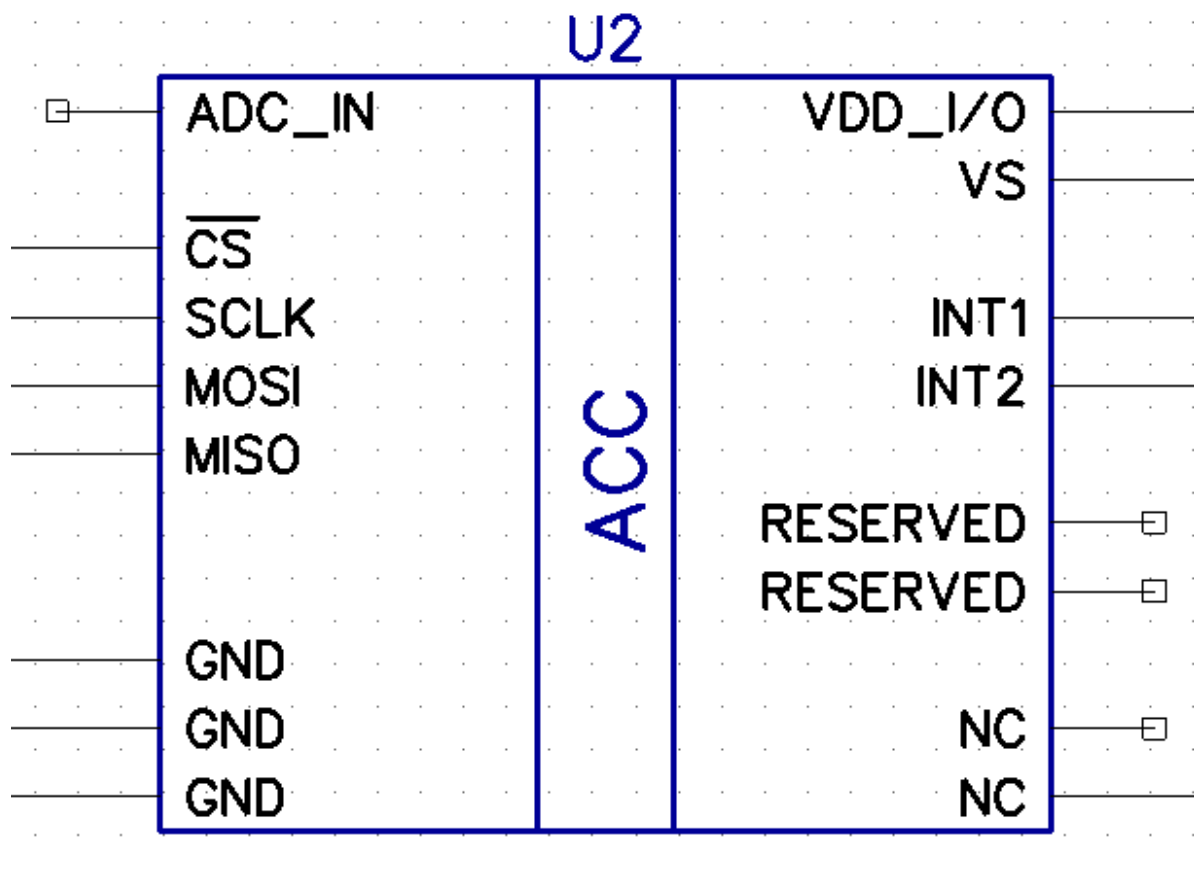


Рисунок 2.3 – Датчик вібрації ADXL363 у системі проектування.

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					26
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З функціональної блок-схеми ADXL363 (рисунок 2.4) видно, що сигнальний тракт датчика включає тривісний MEMS-сенсор, демодулятори осей, антиаліасингові фільтри, 12-бітний АЦП та блок цифрового FIFO з інтерфейсом SPI. Вивід  $ADC_{IN}$  призначений для підключення зовнішнього аналогового сигналу до внутрішнього АЦП датчика; у даній схемі цей вивід не використовується та підключений до GND. Незадіяні виводи NC залишаються непідключеними.

Обмін даними між ADXL363 та STM32F405VGT6 здійснюється по інтерфейсу SPI, для чого в схемі використані лінії SCLK, MOSI, MISO та сигнал вибору мікросхеми CS. Лінія CS підтягнута до шини +3V3 через резистор  $R1 = 10 \text{ кОм}$ , що забезпечує визначений рівень сигналу за відсутності активного керування з боку мікроконтролера. Сигнальні лінії підключені до виводів апаратного блоку SPI1 мікроконтролера STM32F405VGT6 відповідно до рекомендацій технічної документації. Для зменшення впливу високочастотних перешкод у сигнальних лініях можуть застосовуватися серійні резистори малих номіналів, а також правильне трасування доріжок на друкованій платі з урахуванням вимог до цілісності сигналу.

Датчик має виходи переривань INT1 та INT2, які можуть бути використані для сигналізації подій – наприклад, перевищення порогового рівня прискорення або виявлення руху. Відповідні виводи ADXL363 підключені до ліній GPIO мікроконтролера, що дозволяє реалізувати як режим періодичного опитування (polling), так і подієвий режим з апаратними перериваннями. Виводи RESERVED підключені відповідно до вказівок даташиту.

## 2.5 Підсистема живлення, тактування та інтерфейсів підключення

Підсистема живлення призначена для формування стабілізованої напруги 3,3 В з напруги шини USB 5 В, що подається на роз'єм J1 (micro-USB Type-B). Для перетворення напруги використано інтегральний лінійний стабілізатор напруги з малим падінням (LDO) — мікросхему AMS1117-3.3 (U3) у корпусі SOT-223. Вхідна напруга подається на вивід IN стабілізатора безпосередньо від роз'єму J1, а вихідна напруга 3,3 В формується на виводі OUT та розподіляється по шині +3V3 на всі вузли схеми.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

На вході стабілізатора підключено конденсатор C12 ємністю 4,7 мкФ (тип X5R, 10 В) між виводом IN та загальною шиною GND, що забезпечує придушення імпульсних завад від шини USB. На виході стабілізатора підключено конденсатор C13 ємністю 2,2 мкФ (тип X5R, 6,3 В) між виводом OUT та GND, що забезпечує стійкість регулятора та зменшення пульсацій вихідної напруги відповідно до рекомендацій технічної документації.

Втрати потужності на стабілізаторі LDO визначаються різницею вхідної та вихідної напруг і струмом навантаження:

$$P_{LDO} = (U_{in} - U_{out}) \times I, \quad (2.4)$$

де  $U_{in} = 5 \text{ В}$  — вхідна напруга від USB;  $U_{out} = 3,3 \text{ В}$  — стабілізована вихідна напруга;  $I$  — струм навантаження. Розраховані значення для типових режимів роботи наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок втрат на стабілізаторі LDO для різних струмів навантаження

Струм навантаження	Втрати на LDO	Потужність від шини 5 В
50 мА	85 мВт	250 мВт
70 мА	119 мВт	350 мВт
100 мА	170 мВт	500 мВт
150 мА	255 мВт	750 мВт

Робочий струм підсистеми живлення становить приблизно  $I \approx 70 \text{ мА}$ , тому теплові втрати на стабілізаторі складають:

$$P_{LDO} = (5,0 - 3,3) \text{ В} \times 0,070 \text{ А} = 119 \text{ мВт}. \quad (2.5)$$

Від шини 5 В при цьому споживається потужність:

$$P_{5V} = 5,0 \text{ В} \times 0,070 \text{ А} = 350 \text{ мВт} \quad (2.6)$$

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					28
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікросхема AMS1117-3.3 (U3) являє собою лінійний LDO-регулятор на 3,3 В з максимальним вихідним струмом до 1 А та максимально допустимою розсіюваною потужністю до 1,3 Вт у корпусі SOT-223. Розраховане теплове навантаження 85–170 мВт розташоване значно нижче допустимого значення, тому навіть при струмі 100 мА розсіювана потужність близько 170 мВт не спричиняє перегріву стабілізатора.

Тактування мікроконтролера STM32F405VGT6 реалізовано від зовнішнього кварцового генератора ZQ1 із частотою 8 МГц, підключеного до виводів  $OSC_{IN}$  та  $OSC_{OUT}$  мікроконтролера. Внутрішній блок тактування (RCC) конфігурується програмно за допомогою петлі фазового автосинхронізації (ФАПЧ, PLL), що дозволяє досягти робочої тактової частоти ядра 168 МГц. До виводів кварцового генератора підключено два конденсатори навантаження C4 ємністю по 33 пФ, розраховані відповідно до заявленої навантажувальної ємності генератора  $C_L = 18$  пФ згідно з рекомендаціями документації (детальний розрахунок — у підрозд. 3.4).

Інтерфейс підключення пристрою до зовнішніх систем реалізовано на основі вбудованого контролера USB 2.0 OTG FS мікроконтролера STM32F405VGT6. Сигнальні лінії диференційної пари USB (D+ та D-) виведені на роз'єм J1 (мікро-USB Type-B), що використовується одночасно як інтерфейс обміну даними з персональним комп'ютером та як джерело живлення 5 В для підсистеми живлення пристрою. Вбудований контролер USB забезпечує швидкість передачі даних до 12 Мбіт/с (Full Speed) у режимі пристрою (Device mode).

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					29
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ

У попередньому розділі описано апаратну реалізацію системи. У цьому розділі виконано розрахунки, що обґрунтовують працездатність обраних рішень: параметри дискретизації, швидкодію FFT, тактування, живлення та навантаження інтерфейсу SPI.

### 3.1 Вибір та обґрунтування параметрів дискретизації і FFT-аналізу

Вибір основних параметрів цифрової обробки сигналів – частоти дискретизації  $F_s$ , розміру вікна FFT  $N$  та частотної роздільної здатності  $\Delta f$  – є визначальним кроком, від якого залежить як якість діагностичного аналізу, так і вимоги до апаратних ресурсів системи. Для промислового обладнання загального призначення (електродвигуни, насоси, вентилятори) характерні частоти дефектів, пов'язані з частотою обертання та кратними їй гармоніками, як правило, не перевищують 400 Гц. На основі цього встановлено максимальну частоту аналізу  $F_{max} = 400$  Гц. Згідно з теоремою Найквіста–Шеннона, частота дискретизації повинна задовольняти умову:

$$F_s \geq 2F_{max}. \quad (3.1)$$

Підставляючи  $F_{max}=400$  Гц, отримуємо мінімально допустиме значення  $F_s=400$  Гц. Датчик ADXL363 підтримує вихідну частоту даних (ODR) 400 Гц при відповідному налаштуванні регістру FILTER\_CTL (bits [2:0] = 101b за даташитом), що дозволяє обрати  $F_s=400$  Гц без введення додаткових схем дискретизації. Розмір вікна FFT обрано  $N=1024$  відліків як найближчий степінь двійки, що забезпечує ефективне виконання алгоритмів бібліотеки CMSIS-DSP. Частотна роздільна здатність визначається формулою:

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} \quad (3.2)$$

Підставляючи числові значення:

$$\Delta f = \frac{400}{1024} \approx 0,39 \text{ Гц}. \quad (3.3)$$

Тут  $\Delta f$  – крок по осі частоти, Гц;  $F_s = 400$  Гц – частота дискретизації;  $N = 1024$  – кількість відліків у вікні. Отримане значення 0,39 Гц забезпечує розрізнення

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

гармонік з кроком 1 Гц і більше, що відповідає типовим діагностичним задачам. Кількість результуючих спектральних ліній складає  $N/2=512$  при діапазоні від 0 до 400 Гц. Час накопичення одного вікна:

$$T_{\text{вікна}} = \frac{N}{F_s} = \frac{1024}{400} = 2,56\text{с} = 2560\text{мс.} \quad (3.4)$$

Таблиця 3.1 – Основні параметри дискретизації та FFT-аналізу

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Максимальна частота аналізу	$F_{\text{max}}$	400	Гц
Частота дискретизації	$F_s$	400	Гц
Розмір вікна FFT	$N$	1024	відліків
Частотна роздільна здатність	$\Delta f$	0,39	Гц
Кількість спектральних ліній	$N/2$	512	—
Час накопичення вікна	$T_{\text{вікна}}$	2560	мс

### 3.2 Оцінка швидкодії мікроконтролера STM32F405 при виконанні FFT

Для підтвердження виконання умов режиму, близького до реального часу, необхідно оцінити, чи встигає мікроконтролер завершити обчислення FFT в межах часу накопичення одного вікна  $T_{\text{вікна}} = 2560$  мс. Мікроконтролер STM32F405VGT6 функціонує на тактовій частоті  $f_{\text{clk}} = 168$  МГц та містить блок операцій з плаваючою комою (FPU) одинарної точності на ядрі ARM Cortex-M4, що суттєво прискорює виконання алгоритмів цифрової обробки сигналів. Алгоритмічна складність FFT порядку  $NN$  при використанні функції `arm_rfft_fast_f32` бібліотеки CMSIS-DSP становить  $O(N \log 2 N)$ . За результатами відтворюваних тестів на Cortex-M4 з увімкненим FPU, кількість тактів для  $N=1024$  становить орієнтовно від 75 000 (код виконується з RAM,

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					31
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимізація компілятора O2) до 262 823 (без оптимізації, виконання з Flash). Час виконання FFT у гіршому випадку:

$$t_{FFT} = 168 \times \frac{262823}{168 \times 10^6} \approx 1,56 \text{мс.} \quad (3.5)$$

При оптимізованому виконанні:

$$t_{FFT, opt} = 168 \times \frac{75000}{168 \times 10^6} \approx 0,45 \text{мс.} \quad (3.6)$$

Запас часу відносно вікна накопичення:

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{вікна}} - t_{FFT} = 2560 - 1,56 = 2558,44 \text{мс.} \quad (3.7)$$

Відносна частка обчислень FFT від часу вікна:

$$\eta_{FFT} = \frac{t_{FFT}}{T_{\text{вікна}}} \times 100\% = \frac{1,56}{2560} \times 100\% = 0,06\% \quad (3.8)$$

що підтверджує суттєвий запас обчислювального ресурсу для виконання допоміжних операцій.

Таблиця 3.2 – Оцінка часу виконання FFT на STM32F405VGT6 ( $N = 1024$ ,  $f_{clk} = 168$  МГц)

Режим виконання	Кількість тактів	$t_{FFT}$ , мс	$T_{\text{заг}}$ , мс	Частка від $T_{\text{вікна}}$ , %
Без оптимізації (Flash)	262 823	1,56	2558,44	0,06
З оптимізацією O2 (FPU+RAM)	75 000	0,45	2559,55	0,02

### 3.3 Розрахунок підсистеми тактування: детальний опис PLL

Підсистема тактування мікроконтролера STM32F405VGT6 реалізована на основі схеми фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ, PLL), яка перетворює опорний сигнал від зовнішнього кварцового резонатора (HSE) у системну тактову частоту  $\text{SYSCLK} = 168$  МГц. PLL містить чотири програмовані параметри: вхідний дільник PLLM, множник VCO PLLN, вихідний дільник основного тракту PLLP та вихідний дільник тракту USB/SDIO PLLQ. Налаштування цих параметрів виконується через регістр  $\text{RCC\_PLLCFGR}$  у процесі ініціалізації мікроконтролера.<sup>[2]</sup>

Формування  $\text{SYSCLK}$  через PLL відбувається за такою послідовністю:

$$f_{VCO, in} = \frac{f_{HSE}}{PLLM}, \quad (3.9)$$

$$f_{VCO, out} = f_{VCO, in} \times PLLN, \quad (3.10)$$

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					32
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\text{SYSCLK} = \frac{f_{\text{VCO,out}}}{\text{PLL P}}. \quad (3.11)$$

Тут  $f_{\text{HSE}}$  – частота зовнішнього кварцового резонатора, МГц; PLLM – вхідний дільник (2...63); PLLN – множник (50...432); PLLP – вихідний дільник основного тракту (2, 4, 6 або 8). Обмеження:  $f_{\text{VCO,in}}$  повинна бути в діапазоні 1–2 МГц;  $f_{\text{VCO,out}}$  – в діапазоні 100–432 МГц.<sup>[2]</sup>

### Розрахунок параметрів PLL для SYSCLK = 168 МГц

Вихідні дані:  $f_{\text{HSE}} = 8$  МГц, цільова SYSCLK = 168 МГц.

Вибір PLLM для отримання  $f_{\text{VCO,in}} = 1$  МГц:

$$\text{PLLM} = \frac{f_{\text{HSE}}}{f_{\text{VCO,in}}} = \frac{8}{1} = 8. \quad (3.12)$$

$f_{\text{VCO,in}} = 1$  МГц — відповідає вимогам (1–2 МГц).

Вибір PLLP. Оскільки PLLP може приймати лише значення 2, 4, 6 або 8, обираємо PLLP = 2.

Розрахунок PLLN:

$$\text{PLLN} = \text{SYSCLK} \times \text{PLLP} / f_{\text{VCO,in}} = 168 \times 2 / 1 = 336. \quad (3.13)$$

Перевірка:  $f_{\text{VCO,out}} = 1 \times 336 = 336$  МГц — відповідає вимогам (100–432 МГц).

Розрахунок PLLQ для тракту USB (вимога: 48 МГц):

$$\text{PLLQ} = \frac{f_{\text{VCO,out}}}{48} = \frac{336}{48} = 7. \quad (3.14)$$

Остаточні значення параметрів PLL: **PLLM = 8, PLLN = 336, PLLP = 2, PLLQ = 7.**

**Таблиця 3.3 – Розрахункові параметри PLL STM32F405VGT6**

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Частота зовнішнього кварцу	$f_{\text{HSE}}$	8	МГц

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Вхідний дільник PLL	PLLM	8	—
Частота входу VCO	$f_{VCO,in}$	1	МГц
Множник PLL	PLLN	336	—
Частота виходу VCO	$f_{VCO,out}$	336	МГц
Вихідний дільник SYSCLK	PLL P	2	—
Системна тактова частота	SYSCLK	168	МГц
Дільник USB	PLL Q	7	—
Тактова частота USB	$f_{USB}$	48	МГц

### Налаштування шин АНВ, APB1 та APB2

Після налаштування PLL виконується розподіл системної тактової частоти між шинами мікроконтролера. Максимально допустимі частоти: АНВ = 168 МГц, APB2 = 84 МГц, APB1 = 42 МГц:<sup>[2]</sup>

$$HCLK = \frac{SYSCLK}{1} = 168 \text{ МГц}, \quad (3.15)$$

$$PCLK2 = \frac{HCLK}{2} = 84 \text{ МГц}, \quad (3.16)$$

$$PCLK1 = \frac{HCLK}{4} = 42 \text{ МГц}. \quad (3.17)$$

Тут HCLK – частота шини АНВ (ядро, DMA, пам'ять); PCLK2 – частота шини APB2 (SPI1, ADC, TIM1); PCLK1 – частота шини APB1 (SPI2, SPI3, UART, I2C, TIM2–TIM7). Оскільки SPI1 для опитування ADXL363 підключено до шини APB2 (PCLK2 = 84 МГц), максимальна тактова частота SPI може становити  $84/2 = 42$  МГц, що залишає значний запас відносно обраного значення  $f_{SPI} = 8$  МГц. Для коректної роботи при HCLK = 168 МГц необхідно встановити затримку Flash (Flash Latency) на рівні 5 тактів очікування (WS = 5) відповідно до вимог довідкового посібника STM32F405 при напрузі живлення 3,3 В.<sup>[2]</sup>

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

**Таблиця 3.4 – Параметри шин мікроконтролера STM32F405VGT6**

Шина	Дільник	Частота, МГц	Макс. допустима, МГц
AHB	1	168	168
APB2	2	84	84
APB1	4	42	42

### **3.4 Розрахунок підсистеми тактування: кварц і навантажувальні конденсатори**

Для тактування мікроконтролера застосовується зовнішній кварцовий резонатор ZQ1 з номінальною частотою 8 МГц. Зовнішні навантажувальні конденсатори кварцового резонатора розраховуються за формулою:

$$C_{\text{ext}} = 2C_L - C_{\text{stray}}, \quad (3.18)$$

де  $C_L$  – навантажувальна ємність кварцового резонатора за паспортом, пФ;  $C_{\text{stray}}$  – паразитна ємність провідників та виводів мікросхеми, пФ.

Для кварцового резонатора 8 МГц приймається  $C_L = 18$  пФ; паразитна ємність схеми  $C_{\text{stray}} \approx 3$  пФ (оцінка для двошарової друкованої плати з короткими провідниками).

Підставляючи значення:

$$C_{\text{ext}} = 2 \times 18 - 3 = 33 \text{ пФ}. \quad (3.19)$$

З ряду номінальних значень E12 обирається стандартний номінал **33 пФ**. Тип конденсаторів – керамічні з температурним коефіцієнтом C0G/NP0, що забезпечує мінімальну залежність ємності від температури та напруги.

### **3.5 Розрахунок підсистеми живлення та елементів розв'язки**

Підсистема живлення формує стабілізовану напругу  $U_{VCC} = 3,3$  В. Оцінка споживаного струму виконується на основі даних, наведених у підрозд. 2.3.

STM32F405VGT6 при  $f_{\text{clk}} = 168$  МГц споживає орієнтовний струм 50–70 мА

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

(детальний розподіл — у таблиці 2.1); акселерометр ADXL363 при напрузі 3,3 В споживає типово 0,9 мА. Загальний струм навантаження підсистеми живлення:

$$I_{\text{total}} = I_{\text{MCU}} + I_{\text{ADXL}} \approx 70 + 1 = 71 \text{ мА.} \quad (3.20)$$

Потужність, що споживається від шини 3,3 В:

$$P_{3,3} = U_{\text{VCC}} \times I_{\text{total}} = 3,3 \times 0,071 \approx 234 \text{ мВт.} \quad (3.21)$$

Для елементів розв'язки ланцюгів живлення відповідно до рекомендацій виробника STM32F405VGT6 встановлюються:<sup>[3]</sup>

- керамічні конденсатори ємністю 100 нФ (X5R) безпосередньо біля кожного виводу VDD;
- конденсатор ємністю 4,7 мкФ (X5R) для загальної розв'язки шини живлення;
- керамічні конденсатори 2,2 мкФ (X5R, ESR < 100 мОм) для виводів VCAP\_1 і VCAP\_2 внутрішнього стабілізатора ядра.

**Таблиця 3.5 – Елементи розв'язки підсистеми живлення STM32F405VGT6**

Призначення	Тип	Номинал	ESR
Байпасний конденсатор (VDD)	Керамічний, X5R	100 нФ	< 200 мОм
Загальний конденсатор шини	Керамічний, X5R	4,7 мкФ	< 100 мОм
Конденсатор VCAP_1	Керамічний, X5R	2,2 мкФ	< 100 мОм
Конденсатор VCAP_2	Керамічний, X5R	2,2 мкФ	< 100 мОм

### 3.6 Детальний розрахунок навантаження інтерфейсу SPI для трьох осей ADXL363

Зчитування даних акселерометра здійснюється за допомогою команди читання регістрів 0x0B (Read Registers) протоколу SPI. Послідовність транзакції включає активацію лінії CS (переведення в низький рівень), після чого передається:

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

- байт команди читання регістрів: 0x0B (1 байт);
- байт початкової адреси регістра XDATA\_L (адреса 0x0E за ): 1 байт;
- XDATA\_L (молодший байт осі X): 1 байт;
- XDATA\_H (старший байт осі X): 1 байт;
- YDATA\_L (молодший байт осі Y): 1 байт;
- YDATA\_H (старший байт осі Y): 1 байт;
- ZDATA\_L (молодший байт осі Z): 1 байт;
- ZDATA\_H (старший байт осі Z): 1 байт.

Після передачі команди та адреси мікроконтролер STM32F405VGT6 генерує 48 тактових імпульсів SCK, під час яких ADXL363 повертає 6 байт даних з автоматичним інкрементом адреси регістра. Загальна тривалість транзакції становить 8 байт = 64 тактових цикли SPI.

### Розрахунок часових параметрів SPI-обміну

Для надійного обміну та сумісності з ADXL363 обрано частоту SPI  $f_{SPI} = 8$  МГц.

Час однієї SPI-транзакції:

$$t_{SPI} = \frac{64 \text{ біти}}{f_{SPI}} = \frac{64}{8 \times 10^6} = 8 \text{ мкс.} \quad (3.22)$$

За час накопичення одного вікна  $N = 1024$  відліків при  $F_s = 400$  Гц відбувається 1024 транзакції. Сумарний час SPI-обміну за вікно:

$$t_{SPI, total} = 1024 \times 8 \text{ мкс} = 8192 \text{ мкс} = 8,192 \text{ мс.} \quad (3.23)$$

Відносне навантаження SPI від загального часу вікна  $T_{вікна} = 2560$  мс:

$$\eta_{SPI} = \frac{8,192}{2560} \times 100\% = 0,32\%. \quad (3.24)$$

**Таблиця 3.6 – Розрахунок часових параметрів SPI-обміну з ADXL363 ( $f_{SPI} = 8$  МГц)**

Фаза транзакції	Байт	Тривалість, мкс
-----------------	------	-----------------

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Команда читання (0x0B)	1	1,00
Адреса XDATA_L (0x0E)	1	1,00
XDATA_L (вісь X, LSB)	1	1,00
XDATA_H (вісь X, MSB)	1	1,00
YDATA_L (вісь Y, LSB)	1	1,00
YDATA_H (вісь Y, MSB)	1	1,00
ZDATA_L (вісь Z, LSB)	1	1,00
ZDATA_H (вісь Z, MSB)	1	1,00
<b>Разом</b>	<b>8</b>	<b>8,00</b>

**Таблиця 3.7 – Підсумкова оцінка навантаження SPI за вікно вибірки ( $N = 1024$ )**

Параметр	Значення	Одиниця
Частота SPI	8	МГц
Час однієї транзакції	8	мкс
Кількість транзакцій за вікно	1024	—
Сумарний час SPI за вікно	8,192	мс
Час вікна	2560	мс
Відносне навантаження SPI	0,32	%
Запас вільного часу процесора	2550,25	мс

Отримана оцінка підтверджує, що SPI-обмін не є вузьким місцем системи. Запас вільного часу процесора після виконання FFT та SPI-обміну:

$$T_{\text{вільний}} = T_{\text{вікна}} - t_{\text{SPI,total}} - t_{\text{FFT}} = 2560 - 8,192 - 1,56 \approx 2550 \text{ мс}, \quad (3.25)$$

що становить 99,6% загального часу вікна і достатньо для передачі результатів аналізу через USB, формування сповіщень та інших сервісних задач.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					38
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.7 Модельний приклад обробки вібраційного сигналу методом FFT

Для підтвердження працездатності алгоритму спектрального аналізу розглянуто модельний вібраційний сигнал, що містить три гармоніки:

- $f_1 = 50$  Гц з амплітудою  $A_1 = 1,0$  g (основна гармоніка обертання ротора);
- $f_2 = 150$  Гц з амплітудою  $A_2 = 0,4$  g (третя гармоніка);
- $f_3 = 200$  Гц з амплітудою  $A_3 = 0,2$  g (характерна частота дефекту підшипника).

Додатково введено адитивний гаусів шум зі стандартним відхиленням 0,05 g.

Сигнал формується для  $N = 1024$  відліків при  $F_s = 400$  Гц.

Часова реалізація модельного сигналу наведена на рисунку 3.1. Суперпозиція трьох гармонік унеможливорює візуальне розрізнення окремих частотних складових у часовій області.

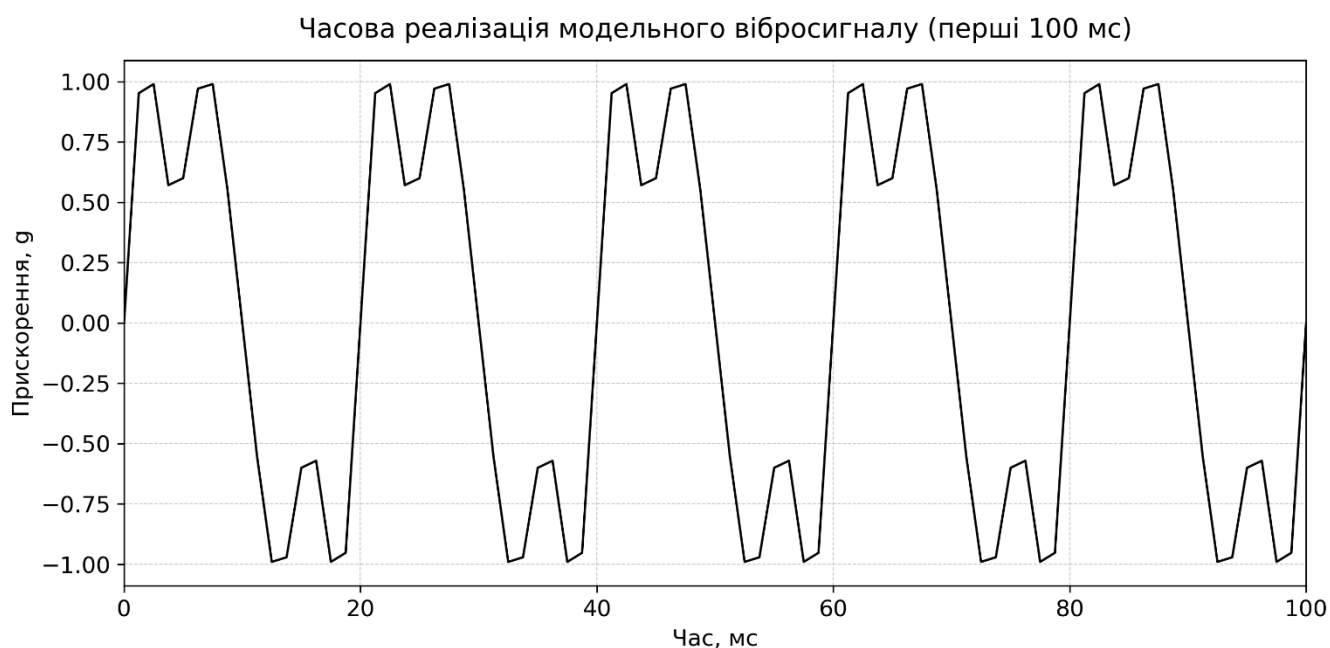


Рисунок 3.1 – Часова реалізація модельного вібраційного сигналу ( $F_s = 400$  Гц, перші 100 мс)

Для виконання спектрального аналізу до вибірки застосовується вагова функція Hann, після чого обчислюється FFT. Нормований амплітудний спектр, поданий на рисунку 3.2, чітко виявляє три спектральні піки на частотах 50, 150 та 200 Гц.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

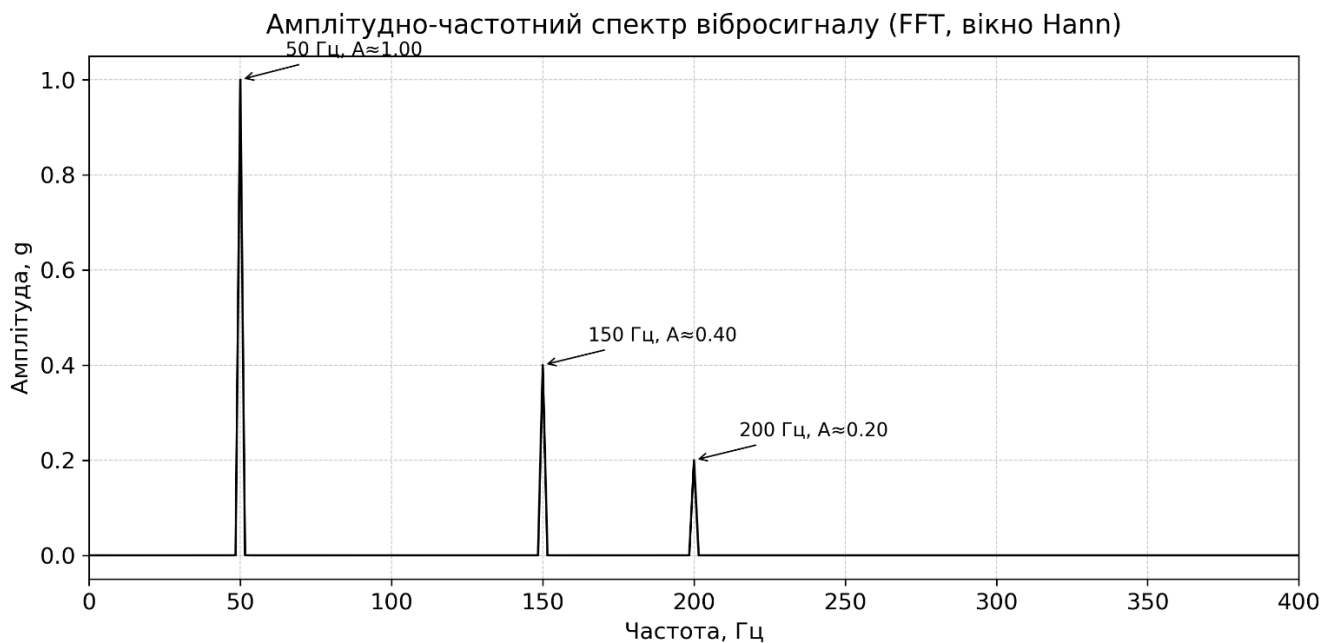


Рисунок 3.2 – Амплітудно-частотний спектр модельного вібросигналу ( $N = 1024$ ,  $\Delta f = 0,39$  Гц)

Таблиця 3.8 – Результати FFT-аналізу модельного сигналу

Гармоніка	Задана частота, Гц	Виявлена частота, Гц	Задана амплітуда, g	Виявлена амплітуда, g
$f_1$ (основна)	50	50,00	1,00	0,499
$f_2$ (3-тя гарм.)	150	150,00	0,40	0,198
$f_3$ (дефект підш.)	200	200,00	0,20	0,100

Відхилення виявлених амплітуд від заданих обумовлено нормувальним коефіцієнтом вікна Hann ( $\approx 0,5$ ) і може бути скориговане введенням **корекційного множника 2** у формулу нормування. Точне розміщення піків на заданих частотах з похибкою менше 1 Гц підтверджує коректність частотної роздільної здатності  $\Delta f = 0,39$  Гц та правильність роботи алгоритму спектрального аналізу.

Сценарій 2. Зародження дефекту підшипника. Для перевірки чутливості алгоритму до типових дефектів змодельовано сигнал, у якому до основної гармоніки  $f_1 = 50$  Гц ( $A_1 = 1,0$  g) додано дефектну складову  $f_d = 120$  Гц ( $A_d = 0,15$  g) з двома бічними

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					40
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

смугами  $f_d \pm f_1$  (тобто 70 Гц і 170 Гц) амплітудою по 0,05 g, що є характерною ознакою амплітудної модуляції при дефекті зовнішнього кільця підшипника. Решта параметрів ( $N = 1024$ ,  $F_s = 400$  Гц, вікно Hann) збережено.

Результати наведено в таблиці 3.9. У спектрі коректно виявлено як основну гармоніку, так і дефектну складову разом із бічними смугами, рознесеними на величину частоти обертання. Це підтверджує, що частотної роздільної здатності  $\Delta f = 0,39$  Гц достатньо для розрізнення близько розташованих діагностичних ознак.

Таблиця 3.9 – Результати FFT-аналізу сигналу з дефектом підшипника

Складова	Задана частота, Гц	Виявлена частота, Гц	Задана амплітуда, g
Основна гармоніка	50	50,00	1,00
Бічна смуга (нижня)	70	70,00	0,05
Дефектна складова	120	120,00	0,15
Бічна смуга (верхня)	170	170,00	0,05

Проведені модельні дослідження підтверджують правильність вибору частоти дискретизації  $F_s = 400$  Гц, розміру вікна  $N = 1024$  та вагової функції Hann. Алгоритм коректно локалізує як основні гармоніки обертання, так і дефектні складові з бічними смугами при похибці визначення частоти менше  $\Delta f = 0,39$  Гц, що дозволяє ідентифікувати типові частоти дефектів обертового обладнання без використання реального вимірювального стенда.

### 3.8 Алгоритм роботи мікроконтролерної системи

Програмне забезпечення мікроконтролера STM32F405VGT6 реалізує циклічний алгоритм збору та спектральної обробки вібраційних сигналів у режимі, близькому

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					41
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до реального часу. Узагальнену послідовність роботи системи наведено на рисунку 3.3.

Після подачі живлення виконується ініціалізація периферії: налаштування підсистеми тактування (PLL → SYSCLK = 168 МГц згідно з підрозд. 3.3), конфігурація інтерфейсу SPI1, ліній GPIO, таймера дискретизації та контролера USB. Далі програмно конфігурується акселерометр ADXL363: встановлюється діапазон вимірювання, вихідна частота даних ODR = 400 Гц (регістр FILTER\_CTL) та режим вимірювання.

В основному робочому циклі за сигналом таймера з частотою  $F_s = 400$  Гц ініціюється зчитування відліків прискорення по трьох осях через SPI з використанням DMA, що мінімізує завантаження ядра. Відліки накопичуються у кільцевому буфері до набору  $N = 1024$  значень для кожної осі.

Після заповнення буфера до сигналу застосовується вагова функція Hann для зменшення спектральних витікань, після чого викликається функція швидкого перетворення Фур'є `arm_rfft_fast_f32` бібліотеки CMSIS-DSP. З отриманих комплексних коефіцієнтів обчислюється нормований амплітудний спектр, на основі якого формуються діагностичні ознаки (амплітуди на характерних частотах, загальний рівень вібрації). Результати передаються на зовнішній пристрій через інтерфейс USB, після чого цикл повторюється.

Безпосередню роботу зі спектром реалізовано засобами бібліотеки CMSIS-DSP. Перед першим викликом одноразово ініціалізується структура `arm_rfft_fast_instance_f32` за допомогою `arm_rfft_fast_init_f32` для розміру перетворення  $N = 1024$ . У робочому циклі функція `arm_rfft_fast_f32` приймає вхідний дійсний буфер відліків (попередньо помножений на коефіцієнти вікна Hann) і записує результат у вихідний буфер у форматі чергування дійсної та уявної частин. Модуль кожного спектрального коефіцієнта обчислюється функцією `arm_cmplx_mag_f32`, після чого амплітудний спектр нормується на кількість відліків  $N$  з урахуванням коефіцієнта вікна. Використання FPU одинарної точності ядра

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Cortex-M4 забезпечує виконання всього перетворення за час, значно менший за період накопичення вікна (підрозд. 3.2).

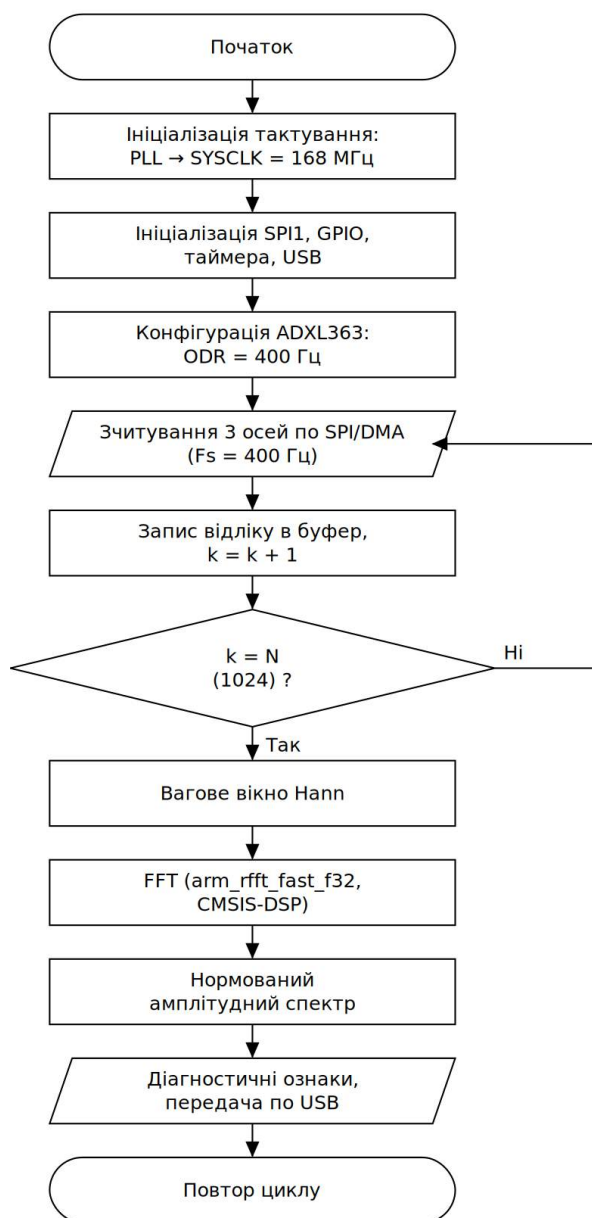


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролерної системи аналізу вібрацій

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					43
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано розробку структурної та принципової схем мікроконтролерної системи вібраційної діагностики технологічного обладнання на основі акселерометра ADXL363 та мікроконтролера STM32F405VGT6.

В результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи розроблено мікроконтролерну систему вібраційної діагностики обладнання, що забезпечує неперервний моніторинг механічних коливань у трьох ортогональних площинах та виконує спектральний аналіз вібраційних сигналів із оновленням спектра кожні 2,56 с.

Об'єктом розробки є апаратно-програмний комплекс на базі мікроконтролера STM32F405VGT6 та тривісного MEMS-акселерометра ADXL363 виробництва Analog Devices.

У ході виконання роботи отримано такі основні результати:

1. Розроблено структурну схему системи, яка включає такі функціональні вузли: вузол сенсора вібрацій на базі ADXL363, вузол мікроконтролерної обробки на STM32F405VGT6, підсистему живлення та тактування, інтерфейс передачі даних.
2. Розроблено принципову електричну схему пристрою з урахуванням рекомендацій виробників компонентів щодо підключення елементів розв'язки живлення, кварцового резонатора та SPI-інтерфейсу.
3. Розроблено алгоритм роботи мікроконтролерної системи (ініціалізація → збір буфера N відліків → віконна обробка  $N_{\text{ann}}$  → FFT засобами CMSIS-DSP → формування діагностичних ознак) та подано його у вигляді блок-схеми (рис. 3.3).

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

4. Виконано розрахунок параметрів дискретизації та FFT-аналізу, підтверджено відповідність частотної роздільної здатності  $\Delta f = 0,39$  Гц вимогам технічного завдання.
5. Розраховано основні електричні вузли пристрою: параметри стабілізатора напруги AMS1117-3.3, струм споживання мікроконтролера та периферії, навантаження інтерфейсу SPI, параметри кварцового резонатора та PLL.
6. Виконано модельне підтвердження алгоритму спектрального аналізу: при обробці вібраційного сигналу з гармоніками 50, 150 і 200 Гц за допомогою FFT з вікном Hann досягнуто точне визначення частот усіх гармонік при похибці менше 1 Гц, що підтверджує коректність вибраної частотної роздільної здатності  $\Delta f = 0,39$  Гц.

Розроблена система може застосовуватися в таких галузях:

- діагностика вузлів обертового обладнання: електродвигунів, насосів, вентиляторів, компресорів;
- виявлення дисбалансу ротора, дефектів підшипників та механічних резонансів за характерними частотами у спектрі;
- вбудовані системи моніторингу технічного стану (condition monitoring) в промисловій автоматизації та системах промислового Інтернету речей (IIoT);
- навчальні та дослідницькі стенди для вивчення методів цифрової обробки сигналів та вібраційного аналізу.

Практична цінність роботи полягає у розробці готового апаратного рішення з детально обґрунтованими розрахунками всіх ключових вузлів, що може бути використане як основа для промислового зразка або для подальшого розширення функціональності – наприклад, додавання бездротового інтерфейсу передачі даних, хмарного зберігання результатів або алгоритмів машинного навчання для автоматичної класифікації дефектів.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### Нормативні документи

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. – Чинний від 2015-06-22. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 31 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Чинний від 2016-07-01. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 20 с.
3. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень українською мовою. Загальні вимоги та правила. – Чинний від 2013-08-22. – Київ : Мінекономрозвитку, 2014. – 17 с.
4. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines. — Geneva : International Organization for Standardization, 2016. — 36 p.
5. ISO 10816-3:2009. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW. — Geneva : ISO, 2009. — 24 p.

### Технічна документація виробників

4. Analog Devices. ADXL363: Micropower, 3-Axis,  $\pm 2$  g/ $\pm 4$  g/ $\pm 8$  g Digital Output MEMS Accelerometer : Data Sheet / Analog Devices, Inc. – Rev. E. – Norwood, MA : Analog Devices, 2017. – 44 p. – URL:  
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl363.pdf> (дата звернення: 28.05.2026).
5. STMicroelectronics. STM32F405xx, STM32F407xx: Arm® Cortex®-M4 32b MCU+FPU : Datasheet DS8626 / STMicroelectronics. – Rev. 12.0. – Geneva : STMicroelectronics, 2023. – 218 p. – URL:

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

<https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf> (дата звернення: 28.05.2026).

6. STMicroelectronics. RM0090 Reference Manual: STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 Advanced Arm-Based 32-bit MCUs / STMicroelectronics. – Rev. 19. – Geneva : STMicroelectronics, 2023. – 1747 p. – URL: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/dm00031020.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00031020.pdf) (дата звернення: 28.05.2026).
7. Arm Limited. CMSIS-DSP Software Library: Version 1.15.0 / Arm Limited. – Cambridge : Arm, 2023. – URL: <https://arm-software.github.io/CMSIS-DSP/main> (дата звернення: 28.05.2026).

#### **Базові підручники з цифрової обробки сигналів**

8. Oppenheim A. V. Discrete-Time Signal Processing / A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. – 3rd ed. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2010. – 1108 p.
9. Proakis J. G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications / J. G. Proakis, D. G. Manolakis. – 4th ed. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2006. – 1084 p.
10. Лях О. В. Цифрова обробка сигналів з практикумом в Maple : навч. посіб. / О. В. Лях. – Херсон : Видавництво ХДУ, 2021. – 198 с.

#### **Базові підручники з мікроконтролерів та вбудованих систем**

11. Бойко В. І. Основи схемотехніки електронних систем : підручник / В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін. – Київ : Вища школа, 2004. – 568 с.
12. Yiu J. The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors / J. Yiu. – 3rd ed. – Oxford : Newnes, 2013. – 848 p.
13. Ловейкін В. С. Мехатроніка : підручник / В. С. Ловейкін, Ю. В. Ромасевич. – Київ : НУБіП, 2020. – 404 с.

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

## Базові підручники з вібраційного аналізу та технічної діагностики

14. Мігуль Д. В. Вібраційна діагностика машин: проєктування, виготовлення, експлуатація : монографія / Д. В. Мігуль, В. Архун. – Харків : Мачулін, 2024. – 221 с.
15. Моніторинг, діагностування та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів : монографія / [В. В. Коцюбинський та ін.]. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 196 с. – URL:  
<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/10126/Monografia.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).

## Наукові статті та матеріали конференцій (2021–2026)

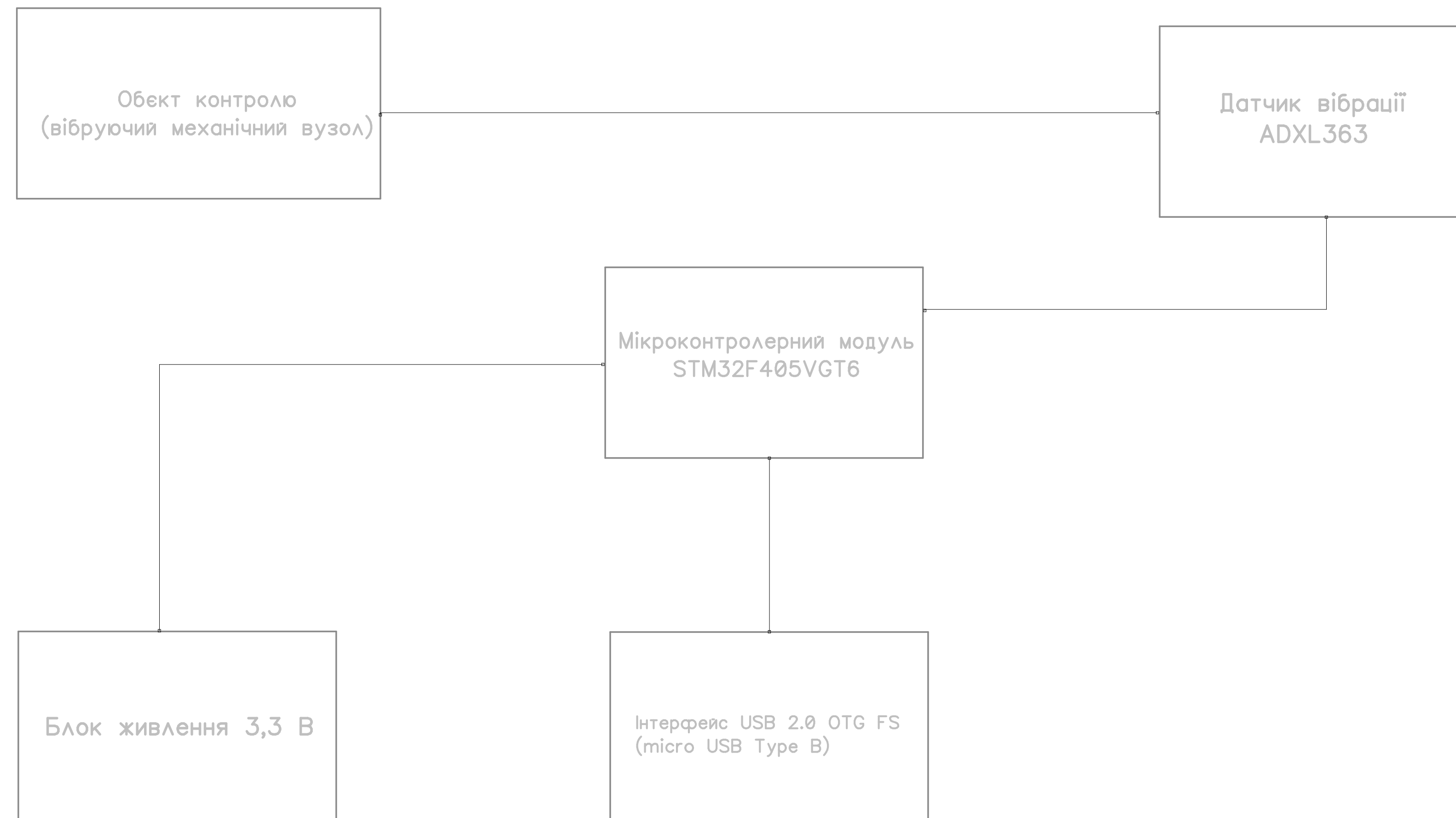
16. Бовсуновський А. П. Вібраційна діагностика тріщин в лопатках турбіни за параметрами коливань / А. П. Бовсуновський // Вібрації в техніці та технологіях. – 2021. – № 3 (102). – С. 14–21. – URL:  
<http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/October2021/cJ8WUL3o8BJR5ALuYDMU.pdf> (дата звернення: 27.05.2026).
17. Chaudhury S. Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer / S. Chaudhury, A. Sengupta // Proceedings of 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology. – Kharkiv, 2022. – P. 1–6. – DOI:  
10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916399.
18. Кривоніс В. М. Бездротовий вібраційний перетворювач на основі MEMS для промислових систем моніторингу / В. М. Кривоніс, О. П. Остапченко // Інформаційні телекомунікаційні технології та радіоелектроніка (ІТТ). – 2022. – № 1. – С. 56–65. – DOI: 10.20535/2411-2976.12022.56-65.
19. Karim A. Low Cost MEMS Accelerometer and Microphone Based Condition Monitoring Sensor with LoRa and Bluetooth Low Energy Radio / A. Karim et al. // HardwareX. – 2024. – Vol. 17. – Article e00497. – DOI:  
10.1016/j.ohx.2024.e00497.

	Виконав				КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ	Арк.
	Керівник					48
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Navarro M. Low-Cost IoT-Based Predictive Maintenance Using Vibration Analysis and Machine Learning / M. Navarro et al. // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 18. – Article 5643. – DOI: 10.3390/s25185643.

	<i>Виконав</i>				<i>КРБ.ЕС. 104285.001.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
	<i>Керівник</i>					
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>49</i>





						<b>КРБ.ЕС.10428527.001.Е3</b>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Піп.	Дата.				
Розроб.		Скриковець О.О.						
Перевір.		Папін О.В.						
№ контр.		Папін О.В.						
Затв.		Зояць Т.М.						
						<b>Мікроконтролерна система аналізу вібрація з FFT-обробкою сигналів</b>		
						Літера	Артк.	Аркуші
						У		1
						УжНУ, ІТФ, гр.ЕС, 4-курс		

<i>Поз. позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кіл.</i>	<i>Примітки</i>
<b>Мікросхеми</b>			
U1	Мікроконтролер STM32F405VGT6, LQFP-100	1	ARM Cortex-M4, FPU, 168 МГц
U2	Акселерометр ADXL363, LGA-16	1	тривісний MEMS, 12-бітний АЦП, SPI
U3	Стабілізатор напруги AMS1117-3.3, SOT-223	1	LDO, 3,3 В
<b>Резистори</b>			
R1	Резистор 10 кОм	1	підтяжка CS до +3V3
R2	Резистор 10 кОм	1	підтяжка лінії NRST
R3	Резистор 10 кОм	1	підтяжка BOOT0
<b>Конденсатори</b>			
C1–C5	Конденсатор керамічний 100 нФ, X5R	5	байпасні (виводи VDD U1)
C6	Конденсатор керамічний 2,2 мкФ, X5R, ESR < 100 мОм	1	VCAP_1
C7	Конденсатор керамічний 2,2 мкФ, X5R, ESR < 100 мОм	1	VCAP_2
C8	Конденсатор керамічний 4,7 мкФ, X5R	1	загальна розв'язка шини +3V3
C9, C10	Конденсатор керамічний 100 нФ, X5R	2	фільтри живлення ADXL363 (VS, VDD_I/O)
C11	Конденсатор керамічний 4,7 мкФ, X5R, 10 В	1	вхід LDO (IN)
C12	Конденсатор керамічний 2,2 мкФ, X5R, 6,3 В	1	вихід LDO (OUT)
C13, C14	Конденсатор керамічний 33 пФ, C0G/NP0	2	навантажувальні кварцу Y1
C15, C16	Конденсатор керамічний 100 нФ, X5R	2	додаткова розв'язка живлення

*КРМ.ЕС.10428527.001.ПЕ*

<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Стрижовець</i>			<b>МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ З FFT-ОБРОБКОЮ СИГНАЛУ</b>	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевірів</i>		<i>Папп О.В</i>				У	1	2
<i>Т.контр</i>						<i>УжНУ, ІТФ, гр. ЕС</i>		
<i>Н/Контр.</i>		<i>Папп О.В</i>				<i>4 курс</i>		
<i>Затвердив</i>		<i>Папп О.В</i>						





Додаток 1

Завідувачу кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ

Тарас ЗАЯЦЬ

Студента (-ки) 2 курсу  
спеціальності ЕС  
Стрижовця О.О.  
(прізвище, ініціали)

## ЗАЯВА

**щодо самостійного виконання  
навчальної/кваліфікаційної роботи здобувачем освіти**

Я, Стрижовець Олександр Олександрович  
(прізвище, ім'я, по батькові),  
Студент(-ка) 4 курсу, ІТФ, ЕС  
(форма навчання, факультет, курс)

заявляю: моя письмова робота на тему: МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА  
АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ З FFT-ОБРОБКОЮ СИГНАЛУ  
виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату.

Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше робіт мають відповідні посилання. Я ознайомлений(а) з діючим Положенням, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску навчальної/кваліфікаційної роботи до захисту та притягнення до академічної відповідальності.

15.06.26

Дата

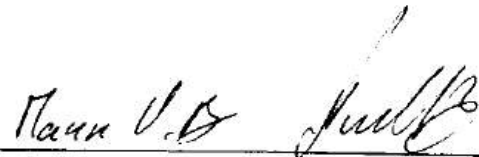
Підпис

Додаток 2.

**ДОВІДКА**  
про результати перевірки на унікальність  
кваліфікаційної, навчальної (курсової) роботи

Автор роботи	Стрижовця О.О.
Назва роботи	МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА
	АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ З FFT-ОБРОБКОЮ
	СИГНАЛУ
Спеціальність	ЕС
Курс	2
Факультет	ІТФ
Кафедра	ЕС
Керівник роботи	Папк О. В.
Роботу перевірено в програмі	StrikePlagiarism.com
Додано до бази даних	Так
Ідентифікаційний номер роботи	334387157
Результати перевірки	
Показник унікальності тексту через перевірку роботи у внутрішній базі кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ	0.98%
Показник унікальності тексту в мережі Інтернет	5.89%

Відповідальна особа/  
Науковий керівник роботи

  
(прізвище, ініціали)

15.06.26

Дата

\_\_\_\_\_  
Підпис

## Метадані

### ДОКУМЕНТ

Заголовок

**МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ**

Автор

**Олександр Олександрович Стрижовець**

ІД документу

**334387157**

### ЗВІТ

Дата звіту

**2026-06-22**

Дата редагування

---

## Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

**25**

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2



КП 2

**2970**

Кількість слів



БЮА

**20493**

Кількість символів

## Індикатор Контенту ШІ

**0%**

## Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про **МОЖЛИВІ** маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		4
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		8

## Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	<a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1532-3_2">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1532-3_2</a>	26 0 (0.88 %)

2	<a href="https://document.kdu.edu.ua/metod/2024_9496.pdf">https://document.kdu.edu.ua/metod/2024_9496.pdf</a>	24 0 (0.81 %)
3	<a href="https://center.ucu.edu.ua/biblioteka-novyny/natsionalni-standarty-z-oformlennya-bibliografii/">https://center.ucu.edu.ua/biblioteka-novyny/natsionalni-standarty-z-oformlennya-bibliografii/</a>	23 0 (0.77 %)
4	<a href="https://cyberleninka.ru/article/n/mnogopotochnaya-realizatsiya-svertki-na-osnove-blochnyh-metodov">https://cyberleninka.ru/article/n/mnogopotochnaya-realizatsiya-svertki-na-osnove-blochnyh-metodov</a>	19 0 (0.64 %)
5	<a href="https://document.kdu.edu.ua/metod/2023_7581.pdf">https://document.kdu.edu.ua/metod/2023_7581.pdf</a>	16 0 (0.54 %)
6	A Guide to the SPHERE 100 Homes Study Dataset Victor Ponce Lopez, Massimo Camplani, George Oikonomou, Dallan Byrne, Ian Craddock, Antonis Vafeas, Robert Piechocki, William Harwin, Przemyslaw Woznowski, Michael Holmes, R. Simon Sherratt, Alessandro Masullo, Emma Tonkin, Atis Elsts, Xenofon Fafoutis, Sion Hannuna, Niall Twomey, Balazs Janko, Dima Damen, Tilo Burghardt, Majid Mirmehdi;	16 0 (0.54 %)
7	<a href="https://link.springer.com/article/10.1186/s42400-023-00174-9">https://link.springer.com/article/10.1186/s42400-023-00174-9</a>	16 0 (0.54 %)
8	<a href="http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/52685/1/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96_%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D0%86%D0%A0%D0%A1_2024.pdf">http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/52685/1/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96_%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D0%86%D0%A0%D0%A1_2024.pdf</a>	15 0 (0.51 %)
9	<a href="https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/20431/1/RSVPU_2017_402.pdf">https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/20431/1/RSVPU_2017_402.pdf</a>	12 0 (0.4 %)
10	<a href="https://center.ucu.edu.ua/biblioteka-novyny/natsionalni-standarty-z-oformlennya-bibliografii/">https://center.ucu.edu.ua/biblioteka-novyny/natsionalni-standarty-z-oformlennya-bibliografii/</a>	8 0 (0.27 %)

#### База даних RefBooks (0.54 %)



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	---

джерело: <https://arxiv.org/>

1	A Guide to the SPHERE 100 Homes Study Dataset Victor Ponce Lopez, Massimo Camplani, George Oikonomou, Dallan Byrne, Ian Craddock, Antonis Vafeas, Robert Piechocki, William Harwin, Przemyslaw Woznowski, Michael Holmes, R. Simon Sherratt, Alessandro Masullo, Emma Tonkin, Atis Elsts, Xenofon Fafoutis, Sion Hannuna, Niall Twomey, Balazs Janko, Dima Damen, Tilo Burghardt, Majid Mirmehdi;	16 (1) (0.54 %)
---	--	-----------------

#### з бази юридичних актів (0.98 %)



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	---

2	Mining equipment diagnostics in a mineshaft dewatering system – case study	0 0 (0 %)
---	--	-----------

#### Інтернет (5.35 %)



#	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-------------	---

3	<a href="https://center.ucu.edu.ua/biblioteka-novyny/natsionalni-standarty-z-oformlennya-bibliografii/">https://center.ucu.edu.ua/biblioteka-novyny/natsionalni-standarty-z-oformlennya-bibliografii/</a>	31 (2) (1.04 %)
---	---	-----------------

4	<a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1532-3_2">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1532-3_2</a>	26 (1) (0.88 %)
---	---	-----------------

5	<a href="https://document.kdu.edu.ua/metod/2024_9496.pdf">https://document.kdu.edu.ua/metod/2024_9496.pdf</a>	24 (1) (0.81 %)
---	---	-----------------

6	<a href="https://cyberleninka.ru/article/n/mnogopotochnaya-realizatsiya-svertki-na-osnove-blochnyh-metodov">https://cyberleninka.ru/article/n/mnogopotochnaya-realizatsiya-svertki-na-osnove-blochnyh-metodov</a>	19 (1) (0.64 %)
---	---	-----------------

7	<a href="https://document.kdu.edu.ua/metod/2023_7581.pdf">https://document.kdu.edu.ua/metod/2023_7581.pdf</a>	16 (1) (0.54 %)
---	---	-----------------

8	<a href="https://link.springer.com/article/10.1186/s42400-023-00174-9">https://link.springer.com/article/10.1186/s42400-023-00174-9</a>	16 (1) (0.54 %)
9	<a href="http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/52685/1/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96_%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D0%86%D0%A0%D0%A1_2024.pdf">http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/52685/1/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96_%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D0%86%D0%A0%D0%A1_2024.pdf</a>	15 (1) (0.51 %)
10	<a href="https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/20431/1/RSVPU_2017_402.pdf">https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/20431/1/RSVPU_2017_402.pdf</a>	12 (1) (0.4 %)