

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Ігоря Сікорського»**

факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Лисенко О. М.
(ініціали, прізвище)

“ 05 ” 06 2020 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку _____ 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і назва)

на тему: Безпроводна система моніторингу вібрацій для прогнозованого
обслуговування електродвигунів

Виконав: студент IV курсу, групи ДК-62
(шифр групи)

Гордієнко Ярослав Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

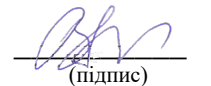
Керівник доцент к.т.н. Короткий Є.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент проф. кафедри АМЕК, к.т.н. проф. Пілінський В.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

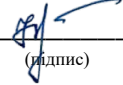
Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри


(підпис)

Лисенко О.М.
(прізвище ініціали)

«01» _____ 04 _____ 2020р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Гордієнко Ярослав Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Безпроводна система моніторингу вібрацій для прогнозованого обслуговування електродвигунів
керівник проекту _ Короткий Євген Васильович, доцент к.т.н.
затвержені наказом по університету №1196с від 25.05.2020 р.
2. Термін подання студентом проекту _ 14.05.2020 р.
3. Вихідні дані до проекту: система складається з одного блоку, що містить в собі сенсор вібрації, модуль зв'язку, блок та джерело живлення. Система повинна забезпечувати передачу інформації про поточний стан досліджуваного електродвигуна.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:
 - Аналіз технічного завдання;
 - Огляд існуючих бездротових систем моніторингу вібрації;
 - Обґрунтування вибору елементної бази;
 - Розробка функціональної схеми системи;
 - Розробка схеми електричної принципової;

- Розробка демонстраційного програмного забезпечення мікроконтролера;
- Розрахунок надійності системи;
- Розробка друкованого вузла;
- Конструкторсько-технологічний розрахунок;
- Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо):

- Складальне креслення системи;
- Складальне креслення розроблених вузлів;
- Креслення розроблених деталей, в т.ч. друкованих плат;
- Схема електрична принципова;


6. Дата видачі завдання _ 1 квітня 2020 р.

Календарний план


№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Розробка ТЗ	1.04 – 7.04	Виконано
2	Підготовка оглядового розділу	8.04 – 15.04	Виконано
3	Розробка схемотехнічних рішень	16.04 – 29.04	Виконано
4	Робота над реалізацією демонстраційного програмного забезпечення на SoC	30.04 – 6.05	Виконано
5	Проведення конструкторсько-технологічних розрахунків	7.05 – 20.05	Виконано
6	Оформлення КД	21.05 – 3.06	Виконано
7	Оформлення ПЗ та дипломного проекту в цілому	4.06 – 10.06	Виконано

Студент

Керівник проекту



(підпис)



(підпис)

Гордієнко Я.О.
(ініціали, прізвище)

Короткий Є.В.
(ініціали, прізвище)

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Безпроводна система моніторингу вібрацій для прогнозованого
обслуговування електродвигунів

Київ – 2020 року

АНОТАЦІЯ

Безпроводна система моніторингу вібрацій для прогнозованого обслуговування електродвигунів // Дипломний проект. Гордієнко Я.О. «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури, група ДК-62. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020. – С. – 66, табл. – 5, креслень – 3, бібліографічних найменувань – 13.

Дипломний проект вирішує задачу схемотехнічного проектування модуля для побудови бездротової системи моніторингу вібрацій для прогнозованого обслуговування електродвигунів та його програмування. Даний пристрій забезпечує реєстрацію та попередній аналіз вібрацій, реалізацію сітчастої мережі на базі протоколу BLE (можлива реалізація на ZigBee та Thread протоколах) та зберігання повноцінного денного датасету інформації в пристрої.

У проекті проведено аналіз існуючих рішень реєстрації та аналізу вібрацій, розглянуто BLE SoC NRF52840, його мережеві та апаратні можливості, розроблено схемотехнічне рішення та демонстраційне програмне забезпечення. Був виконаний конструктивно-технологічний розрахунок для розробки друкованої плати пристрою та обчислено експлуатаційні показники. Структура проекту представлена вступом, 4 розділами, висновками, списком використаних джерел та додатками.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: BLE, SOC, PREDICTIVE MAINTENANCE, IOT, VIBRATION ANALYSIS, NORDIC SEMICONDUCTOR, NRF52840.

ABSTRACT

Wireless vibration's monitoring system for predictive maintenance of electric motors // Graduation Project. Hordiienko Y. O. 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Faculty of Electronics, The Department of Electronic and Computing Equipment Engineering, DK-62. – K.: 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', 2020. – pages – 66, table – 5, technical drawings – 3, bibliographic names – 13.





A Graduation Project deals with the question of module's circuitry design for making a wireless vibration's monitoring system for predictive maintenance of electric motors and for its programming. This device ensures the registration of vibrations and their preliminary analysis, the realization of mesh network based on BLE protocol (also the realization is possible on ZigBee protocol and Thread protocol) and the conservation of full information's dataset in the device.

In this Project the existed solutions' registrations were analyzed, BLE SoC NRF52840 was considered with its network and hardware capabilities, the circuitry solution and demoware were developed. The structural and technical calculations for a device`s printed circuit board were done and the performance indicators were calculated. The structure of Project is embodied with Introduction, 4 Chapters, Conclusions, List of Reference Sources, Annexes.

KEY WORDS: BLE, SOC, PREDICTIVE MAINTENANCE, IOT, VIBRATION ANALYSIS, NORDIC SEMICONDUCTOR, NRF52840..

Зміст

Перелік умовних скорочень, темінів	3
Вступ	4
Розділ 1. Аналіз технічного завдання та огляд існуючих рішень	6
1.1 Вибір досліджуваного фактору	6
1.2 Вибір технології передачі інформації	8
1.3 Аналіз роботи над сенсором	10
Висновки за розділом 1	11
Розділ 2. Розробка електричної схеми системи	12
2.1 Принцип роботи та функціональна схема	12
2.2 Обґрунтування вибору елементної бази	15
2.3 Розробка схеми електричної принципової	21
Висновки за розділом 2	26
Розділ 3. Конструкторсько-технологічні розрахунки	27
3.1 Вибір матеріалу та методу виготовлення друкованої плати	27
3.2 Конструкторсько-технологічний розрахунок елементів ДМ	31
3.3 Електричний розрахунок ДП	38
3.4 Розрахунок надійності	41
Висновки за розділом 3	47

					ДК62.468224.001 ПЗ			
Зм.	Арк	№ документа	Підпис	Дат	Безпроводна система моніторингу вібрації для прогнозованого обслуговування електродвигунів Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Я.О. Гордієнко					1	66
Перевірів		А.С. Кияниця				КПІ ім Ігоря Сікорського, ФЕЛ, гр. ДК-62		
Н.Контроль		О.І. Лисенко						
Затвердив		Є.В. Короткий						

Розділ 4. Розробка програмного забезпечення для пристрою	49
4.1 Особливості внутрішньої структури мікроконтролера	49
4.2 Огляд програмних компонентів розробки	52
4.3 Інструменти для розробки демонстраційного програмного забезпечення	54
4.4 Розробка алгоритму дії демонстраційного програмного забезпечення	55
Висновки за розділом 4	62
Висновки	63
Список використаних джерел	65
Додатки	
Додаток А - Технічне завдання	
Додаток Б - ДК62.750706.001 СП Специфікація	
Додаток В - ДК62.468223.001 ПЕЗ Перелік елементів	
Додаток Г - Лістинг програми	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ADC (АЦП) – Аналого-Цифровий Перетворювач.

ДМ – Друкований Монтаж.

ДП – Друкована Плата.

ОДП – Одношарова Друкована Плата.

ДДП – Двостороння Друкована Плата.

БДП – Багатошарова Друкована Плата.

КМ – Контактний Майданчик.

КП – Контактна Площадка.

КС – Координатна Сітка.

МО – Монтажний Отвір.

ПЗ – Програмне забезпечення.

SoC – System-on-a-Chip.

I²C – Inter-Integrated Circuit.

UART – Universal Asynchronous Receiver Transmitter.

USB – Universal Serial Bus.

BLE – Bluetooth Low Energy.

									Арк.
									3
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат	ДК62.468224.001				

ВСТУП

Новітня промислова індустрія не може дозволити собі зупинятись, а сучасні проблеми вимагають сучасних рішень. Метод прогнозованого обслуговування був створений для змоги визначення стану обладнання, що знаходиться на даний момент в експлуатації. Це потрібно не лише для визначення моменту, коли потрібно провести технічне обслуговування, це дозволяє зручно запланувати його і знизити вірогідність непередбачених відмов обладнання.

Ідеологія прогнозованого обслуговування - автоматизований періодичний або постійний моніторинг стану обладнання, що дозволять провести технічне обслуговування або ремонт в той момент часу, коли це буде найбільш рентабельно і обладнання не втратить ремонтпридатності. В сумі це призводить до зниження незапланованих витрат на ремонт та простій виробництва, що може нести за собою негативні наслідки у вигляді штрафів за невиконання плану.

Невід'ємним позитивним фактором такого обслуговування є те, що для оцінки стану обладнання використовують технології недеструктивного тестування (тестування, що не вимагає внесення змін в досліджуваний об'єкт): інфрачервоний або акустичний контроль, аналіз вібрації, вимірювання рівню звукового випромінювання, аналіз рідин та багато іншого.

Єдиною проблемою прогнозованого обслуговування є нерозвинений ринок обладнання для його проведення. З цього витікає багато негативних факторів: велика ціна та мала конкуренція, що несуть за собою нехтування виробниками своїх обов'язків перед замовниками та багато іншого.

									Арк.
									3
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат	ДК62.468224.001				

На даний момент на ринку представлена лише одна повноцінна система для прогнозованого обслуговування електродвигунів на основі аналізу вібрації - *3561 FC Vibration Sensors* від компанії *Fluke*. Це справді портативні модулі, що об'єднується в одну мережу та дозволяють аналізувати стан великої кількості систем на електродвигунах. Її єдиний недолік - ціна (близько 1100 \$). Незважаючи на невдалий вибір типу побудови мережі (Wi-Fi), потреби в ретрансляторах та відсутності оновлень програмного забезпечення - дана система не має конкурентів.

Метою даного проекту є розробка універсального бездротового модуля детектування та аналізу вібрації не лише електродвигунів, а й інших елементів та конструкцій, і побудови цілісної системи на сітчастій мережевій топології. Безумовними перевагами даного модуля буде його ціна, відсутність ретрансляторів, відкрита документація та універсальність.

Запропонований пристрій можна назвати універсальним – тому, що вирішується не одна задача, а цілий клас задач недеструктивного бездротового аналізу, достатньо лише змінити сенсор та внести незначні корективи в код мікроконтролера.

У роботі розглянуто створення принципової схеми, вибір елементної бази, розробка друкованого вузла, розрахунки, що підтверджують правильність конструктивних рішень та створення демонстраційної програми для мікроконтролера.

					ДК62.468224.001	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

У цьому розділі буде проведений огляд існуючих систем для прогнозованого обслуговування. Із розглянутих методів та рішень будуть обрані такі, що найкраще задовольняють вимогам, що викладені у технічному завданні.

1.1 Вибір досліджуваного фактору

Прийняття одного досліджуваного фактору визначає загальну конструкцію системи моніторингу, її характеристики та вимоги. Складність аналізу стану електродвигуна полягає в тому, що неможливо повністю оцінити його стан поза межами працюючої або тестової системи. Паралельно з цим постає інша проблема - проведення аналізу в працюючій системі накладає обмеження у виборі факторів дослідження [1]. На дослідження накладається безліч зовнішніх факторів: сторонній шум, мала кількість вільного простору, відсутність прямого доступу до об'єкту.

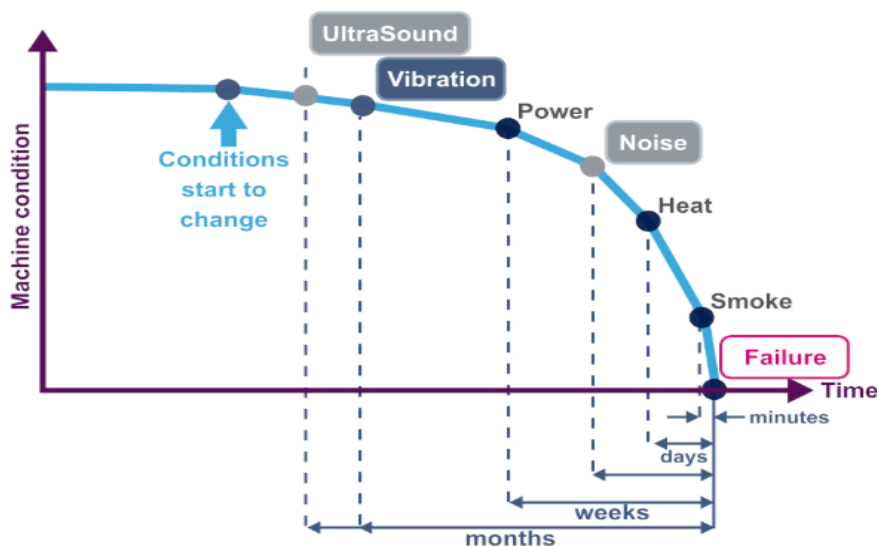


Рисунок 1.1.1 - крива зміни факторів до потенціального виходу з ладу електродвигуна

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Сам вибір фактору дослідження дає можливість оцінити стан системи, та можливість її ремонту, без його досконального аналізу, лише за його наявністю (наявністю підвищеної температури або виділення диму). Судячи з вищезазначеного - логічним буде обрання досліджуваного фактору, що дозволить визначати потенціальний вихід із ладу на максимально ранній стадії.

За даними компанії STMicroelectronics, крива зміни факторів, що впливають на відмовоспроможність, наведена на рисунку 1.1.1 [2].

Найвіддаленішими факторами, що будуть вказувати на потенціальних вихід із ладу є ультразвуковий шум (кілька місяців до потенціального виходу з ладу) та вібрація (від кількох місяців до кількох тижнів). Тим не менш, сфера прогнозованого обслуговування ще не повністю розвинена, тому брати до уваги лише на теоретичні дані - неправильно.

Опираючись на досвід компаній [3] [4], що працюють в даній сфері, було визначено: поява аномальної вібрації - це перша відправна точка для прогнозування обслуговування електродвигуна.

Пошук рішень на базі віброаналізу показав, що це достатньо вільна сфера, і бездротові системи для аналізу вібрації є дієвим інструментом для прогнозованого обслуговування [5] [6], хоч справді хороші та дешеві рішення на ринку відсутні.

					<i>ДК62.468224.001 ПЗ</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

1.2 Вибір протоколу передачі інформації

Вибір бездротової технології визначає основу системи. Це пов'язано з тим, що більшість популярних протоколів передачі даних реалізуються на мікроконтролерах широкого спектру застосування, і їх завданням, зазвичай, є не лише бездротова передача інформації, а й її зчитування, обробка та взаємодія з периферійними модулями. За технічним завданням, вибір протоколу передачі має задовольняти певні критерії: сітчаста топологія мережі та можливість інтеграції із звичними для користувача пристроями (персональний комп'ютер, смартфон або планшет).

Найбільш популярними рішеннями є:

- 1) Sub 1 GHz ;
- 2) Wi-Fi ;
- 3) BLE ;
- 4) Thread ;
- 5) ZigBee ;

Технологія Sub 1 GHz [7] створена для промислового застосування, має чудові характеристики та можливість створення власних рішень передачі інформації. Єдиний недолік - потреба додаткового шлюзу для взаємодії із звичними для користувача пристроями. Персональні комп'ютери, смартфони або планшети не забезпечуються модулями, що можуть працювати з Sub 1 GHz.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

Технологія Wi-Fi [8] має чудову інтеграцію із звичними для користувача пристроями, але не є промисловим рішенням. Найбільшим недоліком є неможливість створення сітчастої топології мережі на пристроях, що побудовані на мікроконтролерах.

Технології BLE, Thread та ZigBee дуже схожі один на одного, працюють в одному частотному діапазоні і їх варто розглядати більш детально. Дослідження компанії Silabs [9] наглядно показує різницю в практичному застосуванні даних протоколів. Хоч кожний з них чудово підходить для реалізації даного технічного завдання, але лише BLE не потребує додаткових зусиль для взаємодії з різними звичними для користувача пристроями, а промислове застосування даного протоколу починає рости [10].

Вибір сітчастої топології мережі обумовлений можливістю максимальної децентралізації ключових точок: роутер, вузол, ретранслятор. Кожний із модулів є незалежним блоком, а інформацію про стан кожного з елементів мережі можна отримати підключившись до однієї з найближчих точок. Таке рішення несе за собою одну важливу перевагу – відмовостійкість, адже, з використанням такої топології, вихід із ладу одного вузла не впливає на роботу всієї мережі.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

1.3 Аналіз роботи над сенсором

Задача аналізу форми вібрацій електродвигунів вимагає використання сенсорів з максимально низьким частотним діапазоном. Оскільки за технічним завданням потрібно використовувати MEMS акселерометр - було проведено аналіз існуючих сенсорів та порівняння їх з промисловими рішеннями.

Основою проблеми є відсутність АЧХ в документаціях на сучасні акселерометри. Проблема з вимірюваннями чудово описана в досліді [11], де автори використали автокореляційну функцію та адаптивні порогові фільтри.

Це дало чудовий результат в усуненні високочастотних шумів, але, тим самим, це унеможливило аналіз дефектів підшипників, які, при наявності проблем, мають високочастотні вібрації.

Тому, для досягнення визначеної в технічному завданні мети, аналіз вібрацій електродвигунів буде проводитись на частотному діапазоні 10-1000 Гц, що повністю охоплює частоти роботи промислових двигунів. Фільтрацію даних з акселерометру, компенсацію нерівномірності АЧХ та визначення спектру буде покладено на потужності обраного мікроконтролера.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

Висновок за розділом 1

Дослідивши можливості сучасних протоколів передачі даних можна зробити висновок про доцільність використання BLE для побудови бездротової системи моніторингу вібрації для прогнозованого обслуговування. Використання MEMS акселерометра робить пристрій не лише дешевим та мобільним, а й зручним у стаціонарному застосуванні.

Розроблюваний пристрій повинен мати взяти усі позитивні сторони розглянутих пристроїв, а саме: фіксувати вібрації, передавати інформацію бездротовими технологіями, мати батарейне живлення для автономної роботи. При цьому мати відкриту документацію.

По результатам проведених патентного пошуку за даними баз Укрпатенту та аналізу сучасного стану ринку безконтактних зчитувачів можна зробити висновок про патентоспроможність розробки та існування можливості заповнення ніші ринку недорогих моделей з сучасними бездротовими мережевими можливостями.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

2. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ

2.1 Принцип роботи та функціональна схема

Для початку тезисно виділимо для себе основні вимоги до пристрою:

- Довготривале батарейне живлення
- Робота пристрою в мережі з топологією Mesh
- Отримання даних за допомогою MEMS акселерометру
- Режим глибокого сну з можливістю роботи за годинником реального часу

З цього можна виділити наступні блоки структурної схеми:

1. Блок бездротової передачі даних.
2. Блок зйому вібрації.
3. Блок живлення безпроводної частини.
4. Блок живлення ЕОМ.
5. Блок живлення MEMS акселерометру.
6. Блок додаткової Flash пам'яті для збереження бази даних.

Розглянувши необхідні елементи функціональної схеми, було розроблено структуру модуля системи, наведену на рисунку 2.1.1.

Більш детально розглянемо кожний блок структурної схеми (рис. 2.1.1), визначимо його складові частини та функції, які він має виконувати.

Сам модуль призначений для адаптивної побудови системи моніторингу вібрації і виступає у вигляді основної структурної одиниці аналізу стану парку обладнання. Зв'язок із ним має бути виконаний за Mesh топологією, побудованою за BLE протоколом, а живлення - уніфікованим, з достатньо великим можливим діапазоном напруги.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

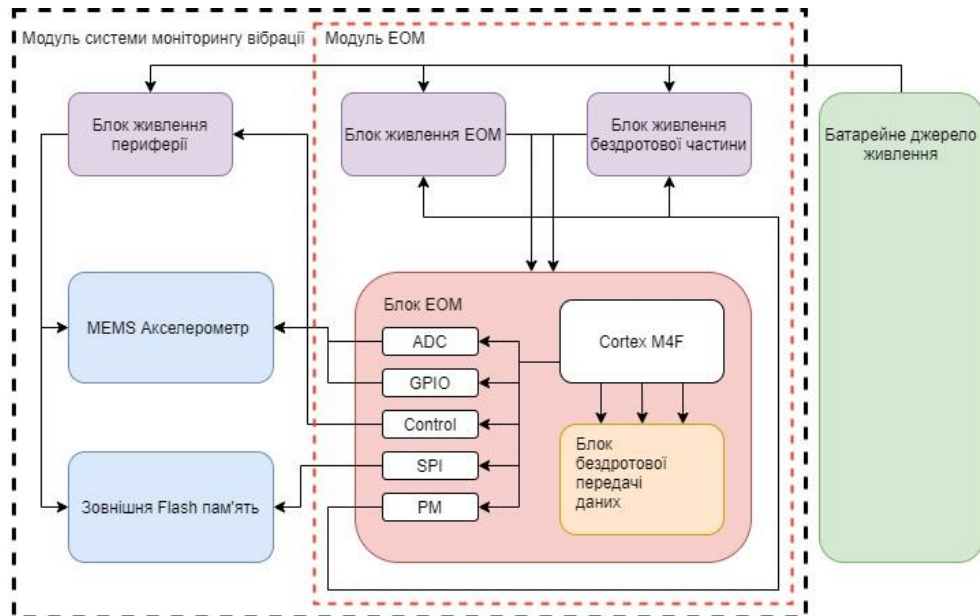


Рисунок 2.1.1. Структура схема модуля системи моніторингу вібрації

Більш детально розглянемо кожний блок структурної схеми (рис. 2.1.1), визначимо його складові частини та функції, які він має виконувати.

Сам модуль призначений для адаптивної побудови системи моніторингу вібрації і виступає у вигляді основної структурної одиниці аналізу стану парку обладнання. Зв'язок із ним має бути виконаний за Mesh топологією, побудованою за BLE протоколом, а живлення - уніфікованим, з достатньо великим можливим діапазоном напруги.

Керування схемою повністю відбувається можливостями ЕОМ, вибір якої дозволяє зменшити використання додаткових електронних компонентів.

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Сама ЕОМ повинна мати в собі ядро Cortex M4F, що, з використанням спеціалізованих операційних систем реального часу, здатно показувати неймовірні показники продуктивності.

Роздільне живлення кожного з основних функціональних блоків модуля забезпечить максимальне енергозбереження, надаючи можливість не просто переводити блоки в режим сну, а повноцінно припиняти подачу живлення. А, оскільки пристрій має працювати від батарейного джерела живлення досить тривалий термін, використання лінійних перетворювачів - недопустимо. Керування роботою кожного з блоку живлення теж покладається на можливості ядра Cortex M4F.

Використання MEMS акселерометру з аналоговою формою подачі сигналу дозволить розкрити максимальний потенціал самого напівпровідникового кристалу сенсору, надаючи інформацію без додаткових спотворень на зовнішніх АЦП (які теж вимагають калібрування, правильного термоконтролю пайки та зберігання в особливих умовах). Додатковою перевагою буде використання якісного джерела опорного живлення в мікроконтролері, що не потребує використання зовнішніх елементів.

Зовнішня Flash пам'ять необхідна для зберігання повноцінного датасету інформації, знятого модулем. Передача даних у вигляді вже сформованого пакету дозволить децентралізувати великий потік невеликих обрахунків, які можна виконати на ЕОМ модуля паралельно з перетворенням наступного пакету даних з аналогового сигналу в цифровий.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

2.2 Обґрунтування вибору елементної бази.

Створення сучасного пристрою потребує використання сучасної елементної бази, при цьому, у теперішній час бурхливого розвитку електроніки, існує надзвичайно великий вибір аналогічних за функціоналом мікросхем. Тому одразу введемо обмеження на критерії вибору:

- використання компонентів поверхневого монтажу у невеликих корпусах;
- віддається перевага мікросхемам, простим у застосуванні рішення з невеликою кількістю зовнішніх компонентів;
- при рівних інших показниках обираємо мікросхему, яку можливо придбати в Україні і яка має меншу вартість;

Вибір ЕОМ, у вигляді мікроконтролера, дуже складний. Ринок бездротових рішень не такий насичений, але вибір є. До основних компаній, що створюють такі рішення, належать: Texas Instrument, Nordic Semiconductor, Cypress Semiconductor, MicroChip та Dialog Semiconductor.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

На сьогоднішній день маємо ось такий список популярних рішень для побудови BLE пристроїв(таб 2.2.1):

Таблиця 2.1.1. Популярні мікроконтролери, та їх виробники, на даний момент.

Виробник	Чіп
Nordic	NRF52840
Dialog	DA14580
Texas	CC2540
Cypress	CY8C6347BZI

Якщо розглядати наведені вище критерії вибору елементної бази - найкращим представником виявиться чіп від Nordic Semiconductor, NRF52840. Він є одним із прекрасних представників сучасної централізації необхідної периферії та обчислювальних можливостей. Мікроконтролер має як і потужне обчислювальне ядро - Cortex M4F, що було одним із вимог ТЗ, так і набір периферії, в яку входять внутрішні DC-DC перетворювачі, необхідні для реалізації справді енергоефективного рішення. Суттєвим недоліком даного мікроконтролера є складний корпус - QFN73, що потребує побудови друкованого вузла 5 класу точності. Тому було прийнято рішення використати готовий бездротовий модуль, побудований на даному мікроконтролері. Найпопулярнішим та найбільш розповсюдженим є модуль BT840 від компанії Fanstel (рисунок 2.2.1)



Рисунок 2.2.1. Зовнішній вигляд мікроконтролерного модуля BT840.

Рішення використати модуль дає відразу багато переваг: відпадає необхідність в обв'язці мікроконтролера, наявність захисного екрану, реалізація якісної друкованої антени на модулі та можливість побудови пристрою на друкованих платах 4 класу точності.

Вибір акселерометру не менш складний етап. Вибір дуже великий, багато виробників, багато моделей у кожного з них. Після довгого аналізу всіх можливих варіантів, було прийнято рішення використати LIS344ALH, від компанії STMicroelectronics (рис 2.2.2). Робота з трьома осями, резонансна частота в 1.8 КГц (що лежить далеко за робочим діапазоном), та нерівномірність АЧХ в 3дБ в діапазоні від 0 до 1.4 КГц - ідеальний вибір за дуже малу ціну. До цього ще й додається можливість регулювання коефіцієнту чутливості між 660 та 220 мВ/(м/с²).

									Арк.
									17
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат	ДК62.468224.001 ПЗ				

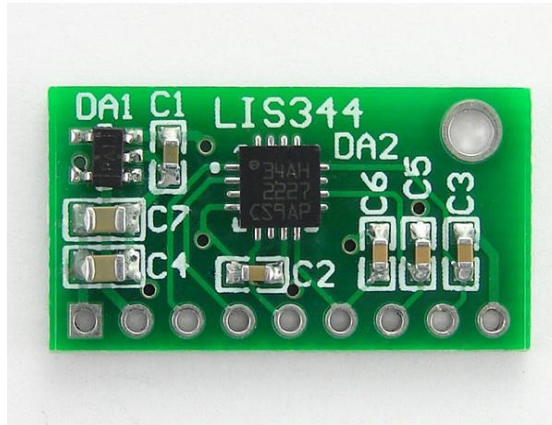


Рисунок 2.2.2. Зовнішній вигляд MEMS акселерометру LIS344ALH

Вибір зовнішньої Flash пам'яті очевидний - M24M02 від компанії STMicroelectronics(рис. 2.2.3). Це найбільш розповсюджена та проста у використанні пам'ять, що вже стала в певному розумінні культовою. Вона підтримує роботу з усіма стандартизованими режимами роботи I2C інтерфейсу, має широкий діапазон напруги живлення та впевненість в більше ніж 4 мільйонах циклів перезапису.

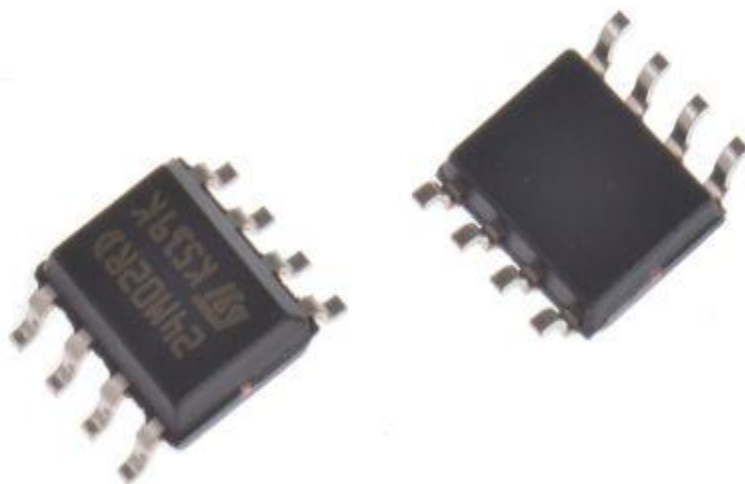


Рисунок 2.2.3. Зовнішній вигляд Flash пам'яті M24M02

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Блок живлення для акселерометру та Flash пам'яті має працювати від батарейного живлення і мати стабільну напругу на виході без залежності від вхідного діапазону. Це є суттєвою проблемою, оскільки нам необхідно отримати стандартні 3.3В від батарейного джерела, що буде з часом втрачати свою енергію, тому лінійний стабілізатор, навіть з малим падінням напруги на ньому, використовувати неможливо. Step-Up DC-DC використовувати теж недоцільно, оскільки таке рішення буде мати великі габарити та необхідність у LDO на виході.

Було прийнято рішення використати мікросхему NX4002-3.3(рис 2.2.4), що є реалізацією «зарядового насосу», і може як підвищувати, так і зменшувати напругу за необхідністю. Це чудове рішення в одному корпусі, що є компактним, недорогим та дієвим.



Рисунок 2.2.4 Зовнішній вигляд мікросхеми NX4002-3.3

Загальними компонентами для усіх блоків являються резистори і конденсатори. До них ставляться наступні вимоги: конденсатори - напруга не менше 15 В, типорозмір 0603; резистори - типорозмір 0603 та $\pm 5\%$ допуск. Обиратимемо компоненти у одного виробника з однакової серії у випадку наявності усіх потрібних

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

номиналів у продажу. Найменшу вартість та наявність усіх номіналів, як конденсаторів так і резисторів, є у виробника Yageo, зовнішній вигляд яких наведено нижче на рис. 2.2.5. Електролітичні конденсатори, в даному пристрої, не використовуються. Це обумовлено багатьма їх недоліками: наявності наскрізного струму, суттєвій часовій деградації, великими розмірами.



Рисунок 2.2.5 Зовнішній вигляд SMD компонентів.

2.3 Розробка схеми електричної принципової.

У попередніх підрозділах була розроблена структурна схема модуля для побудови бездротової системи моніторингу вібрації і обрано сучасну елементну базу для виконання цих блоків. Зв'язок між блоками відбувається трьома методами:

- внутрішня регістрова конфігурація зовнішніх пасивних елементів (робота із внутрішніми DC-DC блоками та необхідною для них периферією);
- зв'язок з MEMS акселерометром по ADC шині;
- I2C протокол взаємодії між ЕОМ та зовнішньою Flash пам'яттю;
- керування конфігурацією акселерометра за допомогою GPIO;
- керування зовнішнім блоком живлення за допомогою GPIO.

Для спрощення розробки принципової схеми використовуватимемо переважно стандартні схеми підключення.

Модуль BT840, від компанії Fanstel, приховує в собі повноцінну реалізацію одного із стандартних включень мікроконтролера NRF52840 (рис 2.3.1). Це означає, що необхідні індуктивності, резистори та конденсатори вже розпаяні в модулі, відповідно до порад офіційних розробників Nordic Semiconductor.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

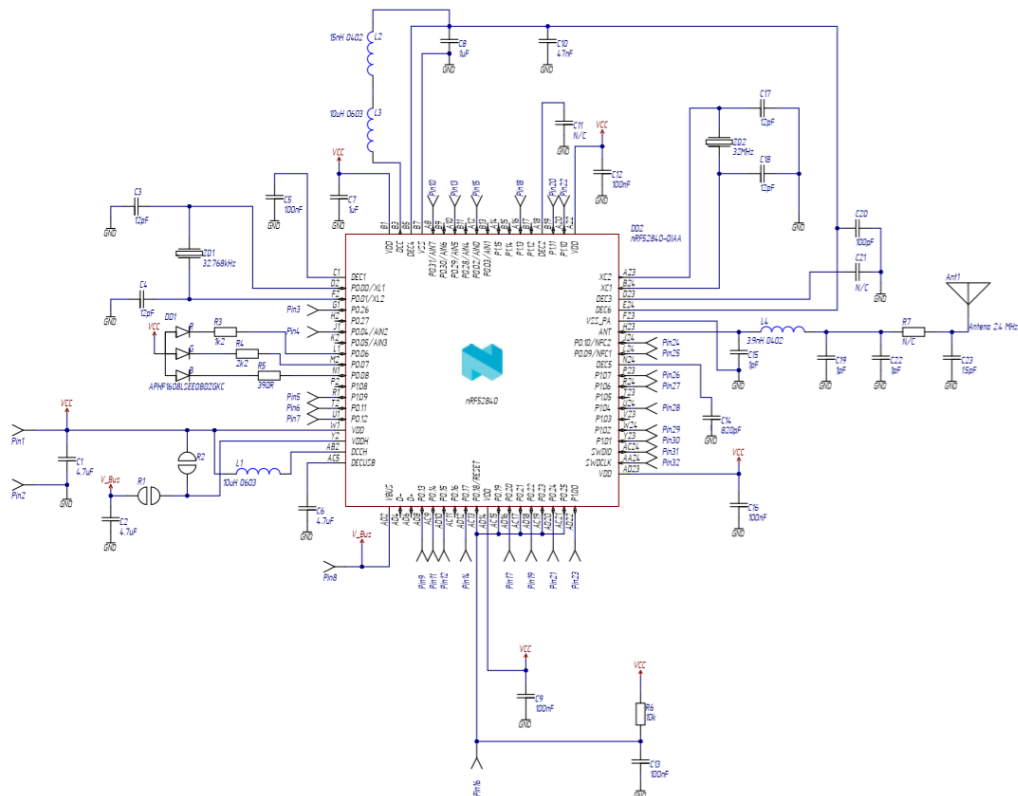


Рисунок 2.3.1. Реалізація включення NRF52840 в модулі BT840.

Особливістю даного включення є реалізація двох DC-DC перетворювачів, прихованих в SoC (рис 2.3.2). В мікроконтролері є блок Flash пам'яті, виділений для задання початкового стану периферії при ввімкненні. Даний блок є початково закритим і можливість запису в нього з'являється лише після повноцінної ініціалізації основних блоків.

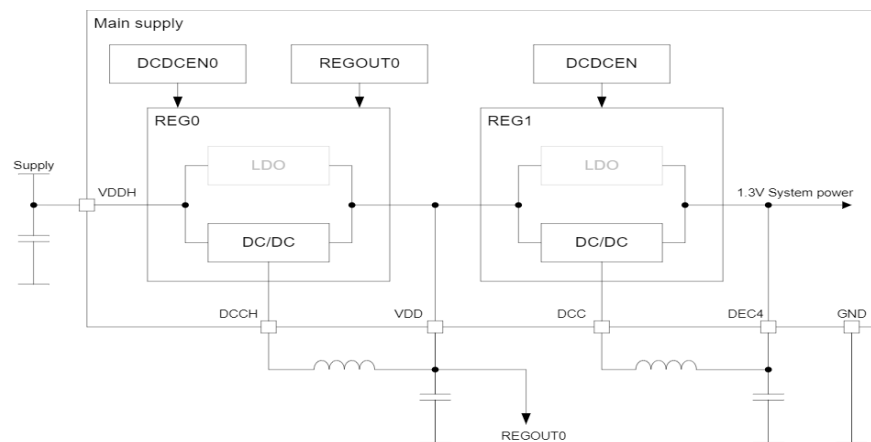


Рисунок 2.3.2. Ввімкнення DC-DC блоків в SoC NRF52840

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Отже, формування напруги для ядра Cortex M4F, та всієї внутрішньої периферії, лягає на плечі першого блоку живлення. Його, та іншого блоку, роботу забезпечує UICR блок регістрів, що є захищеними від запису до повної ініціалізації ядра. Це важливий момент, оскільки при неправильному записі, в даний блок регістрів, запуск мікроконтролеру можлива з неналаштованими DC-DC перетворювачами, що призводить до виходу SoC з ладу.

Але струм, сформований першим DC-DC блоком, недостатній для живлення зовнішньої периферії, у вигляді акселерометру та Flash пам'яті.

Для цього, ще при аналізі та формуванні функціональної схеми було прийнято рішення використання зовнішнього блоку живлення у вигляді мікросхеми “зарядового насосу” HX4002-3.3(рис 2.3.3).

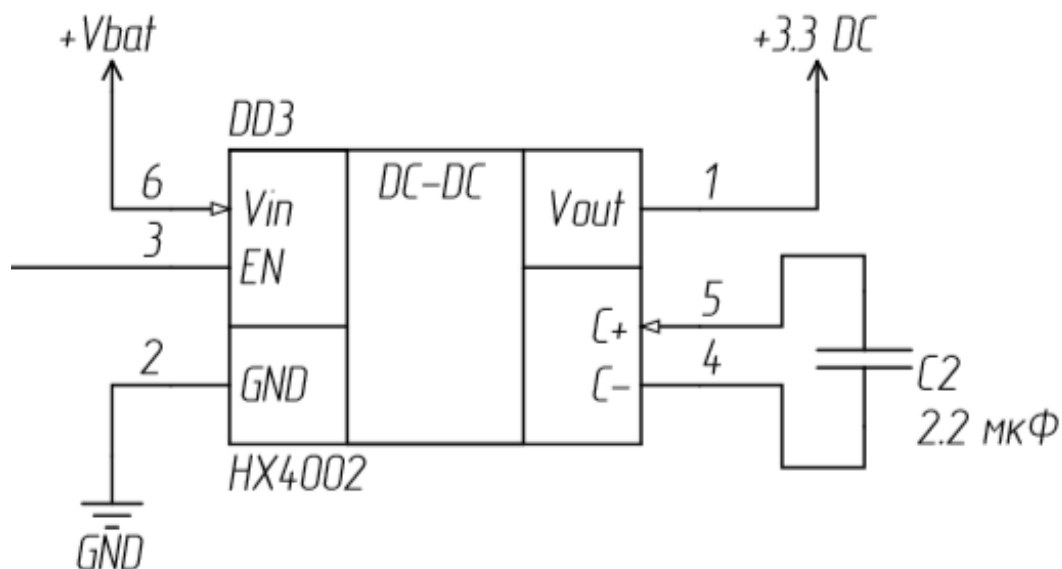


Рисунок 2.3.3 Ввімкнення HX4002-3.3

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Даний блок отримує керуючий сигнал від модуля EOM, та, без залежності (в робочому діапазоні) від вхідної напруги Vbat, формує необхідні 3.3В для роботи акселерометру та Flash пам'яті. Керуючий сигнал на контакті EN має логічний рівень в 3.3В, який буде сформовано внутрішнім DC-DC блоком SoC лише у випадку повної ініціалізації. Тому периферія ніколи не буде споживати енергію без відома мікроконтролера.

Flash пам'ять має інтерфейс I2C та 2 контрольних сигнали . NRF52840 має мультиплексований формат вихідної периферії, тому внутрішній блок I2C можна налаштувати на будь-які GPIO контакти SoC (рис. 2.3.4). Живлення пам'ять отримує напряму від HX4002-3.3.

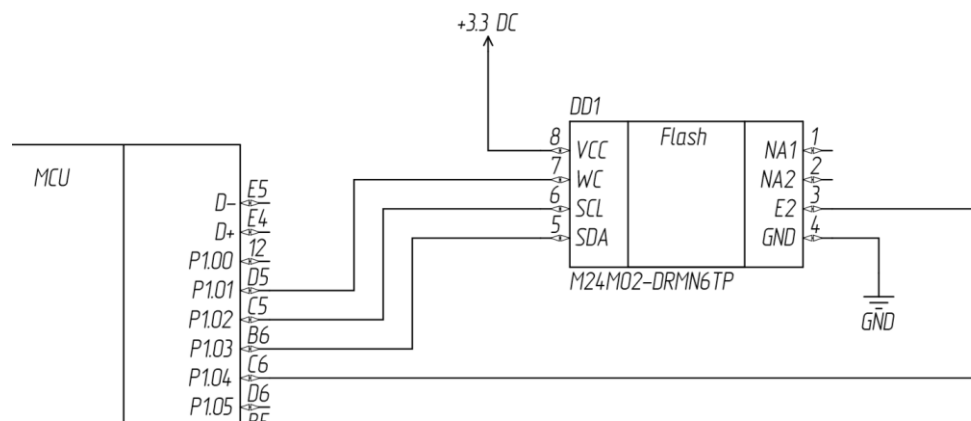


Рис 2.3.4 Схема ввімкнення flash пам'яті

Вибір акселерометру з аналоговим виходом, логічно, потребує аналогового входу на SoC. Обраний NRF52840 повністю задовільняє ці потреби, оскільки має повноцінний 14-бітний ADC, з можливістю програмного налаштування опорної напруги. Тому потреби в зовнішніх мікросхемах ADC немає. Сам акселерометр LIS344ALH, окрім живлення та сигнального виходу, має контакти для прямого керування(рис. 2.3.5): канал самотестування, канал зміни режиму

живлення та канал зміни вимірюваного діапазону (660 та 220 мВ/(м/с²)).

Необхідності в застосуванні певних частин даної мікросхеми немає, але, для гнучкості у використанні, було прийнято рішення віддати керування даними функціями мікроконтролеру.

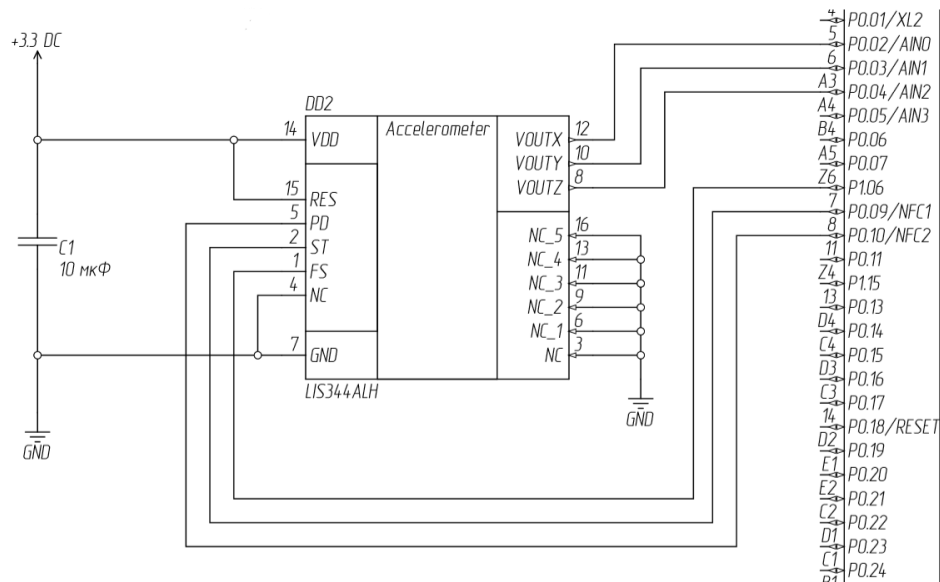


Рисунок 2.3.5 Схемотехнічне рішення ввімкнення акселерометру

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

ДК62.468224.001 ПЗ

Арк.

25

Висновки за розділом 2

Перевагами у використанні модуля BT840, від компанії Fanstel, на NRF52840 у якості обчислювального модуля стали: відсутність у необхідності створення друкованого вузла 5 класу точності, складних розрахунків антени, простий процес пайки, наявність захисного екрану. Аналоговий акселерометр, з діапазоном вихідного сигналу від 0В до 3.3В, повністю сумісний з ADC мікроконтролера, оскільки він має внутрішнє програмоване джерело опорної напруги. Використання ж зовнішньої Flash пам'яті дозволяє зберігати повний датасет зібраних даних перед відправленням їх в мережу.

В рамках даного розділу обґрунтовано вибір усіх складових елементів блоків пристрою. При цьому віддано перевагу мінімізації розмірів та вартості компонентів без погіршення характеристик пристрою. Уся використана елементна база доступна у продажі на ринку електронних компонентів.

Використовуючи отримані навички та документацію виробників електронних компонентів розроблено схему електричну принципову пристрою, яка є вихідною для його подальшого конструювання.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ

3.1 Вибір матеріалу та методу виготовлення друкованої плати

Вибір типу та матеріалу ДП(друкована плата):

Розроблювана ДП повинна мати велику щільність розміщення компонентів, високу надійність та механічну міцність кріплення елементів. Таким критеріям відповідають ДДП (двостороння друкована плата). Вони володіють високою щільністю монтажу, підвищеною надійністю з'єднань, дозволяють полегшити трасування провідників і оптимізувати розміри плати завдяки щільному розміщенню елементів. ОДП (одношарова друкована плата), у свою чергу, мають низькі монтажні та трасувальні можливості, тому їх застосування не є доцільним. БДП (багатошарова друкована плата) складні у виробництві й збільшують вартість.

Виходячи з аналізу різних типів ДП, вибираємо ДДП. Це дозволяє забезпечити необхідну точність, щільність монтажу, надійність і мінімізувати вартість.

Вибір матеріалів, методу виготовлення, додаткових особливостей виготовлення ДП впливає не лише на працездатній та надійність, але і суттєво визначає кінцеву вартість вибору, тому до цього вибору потрібно ставитись із зваженим рішенням.

При виробництві ДП використовують виключно імпортні матеріали. Матеріали, які застосовуються в якості міжшарового діелектрика, повинні мати високоізоляційні властивості, достатню механічну міцність, бути стійкими до зовнішніх кліматичних впливів, певний рівень вогнетривкості.

При виробництві ДП застосовуються вітчизняні та імпортні матеріали різних виробників. Матеріали, що застосовуються в якості

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		27

основи для ДП, повинні мати: високі електроізоляційні властивості, достатню механічну міцність, бути стійкими до кліматичних впливів, опірність до займання.

Для цих параметрів виділені полімерні композиційні матеріали FR-1, FR-2, FR-3, FR-4 та FR-5. Найбільш поширеним матеріалом для виробництва ДДП і БДП є FR-4. Стандартний FR-4 являє собою композитний матеріал на основі скловолокна з підвищеною вогнетривкістю.

Для реалізації друкованого вузла був обраний FR4-2-35-1,5. Даний матеріал має товщину 1,5 (мм) та, з двох сторін, має мідну фольгу товщиною 35 мкм. Цей матеріал відповідає наведеним критеріям вище. Також FR-4 дозволяє отримати отвори високої якості, що важливо для створення якісних перехідних отворів та дотримання допусків до 5 класу точності.

Вибір класу точності виконання ДП:

ГОСТ 23571-86 передбачає п'ять класів точності ДП. Точність виготовлення ДП залежить від комплексу технологічних параметрів і з практичної точки зору визначає основні параметри елементів ДП. В першу чергу це відноситься до мінімальної ширини провідників, мінімального зазору між елементами провідного рисунка і до ряду інших параметрів.

Виходячи з того, що у проекті використовуються компоненти лише в планарних корпусах, а використання бездротового модуля усуває необхідність в роботі з BGA корпусами мікросхем, обираємо 4-й клас точності. Такий вибір дасть змогу виконати не лише коректне трасування провідників, а й зробить виготовлення даних плат більш дешевим.

При конструкторському-технологічному розрахунку необхідно використовувати граничні значення елементів друкованого монтажу

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		28

з урахуванням похибки їх виконання. Необхідні граничні значення елементів друкованого монтажу і допустимі похибки наведено в табл 3. 1, 2.

Таблиця 3.1 — Граничні значення основних параметрів ПМ [13]

Параметр	Позначення	Клас точності			
		2	3	4	5
Ширина друк. провідника, (мм)	$b_{\text{пр}}^r$	0,45	0,25	0,15	0,1
Відстань між елементами друкованого провідника	l^r	0,45	0,25	0,15	0,1
Гарантований поясок, (мм)	$b_{\text{по}}$	0,2	0,1	0,05	0,03
Відношення ном.діаметру найм. з метал. отворів до товщ. ДП, (мм)	$K_{\text{дт}}$	0,4	0,33	0,25	0,2

Таблиця 3.2 — Допустимі похибки виконання елементів ПМ [13]

Похибка	Позначення	Максимальне значення, (мм)
Зміщення провідників відносно ліній КС (координатна сітка)	$\delta_{\text{сп}}$	0,05
Розташування отворів (всіх) відносно вузлу КС	$\delta_{\text{о}}$	0,07
Розташування КП (контактна площадка) відносно вузла КС	$\delta_{\text{км}}$	0,015(0,05)
Фотокопії та фотошаблону	$\delta_{\text{фф}}$	0,06
Розташування КП відносно вузла КС на фотошаблоні	$\delta_{\text{фш}}$	0,05

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

ДК62.468224.001 ПЗ

Арк.

29

Вибір методу виготовлення ДП

Виготовлення друкованої плати, з розглянутим вище вимогами, розглядалось методами, що застосовуються в сучасному виробництві:

- метод пошарового нарощування
- комбінований позитивний метод
- хімічний субтрактивний метод
- метод попарного пресування друкованих плат

Після додаткового аналізу технічного завдання, обраного типу та матеріалу ДП, було обрано комбінований позитивний метод, за яким працюють найбільш розповсюджені виробники ДП. Також це обумовлено наявністю великої кількості перехідних отворів, що необхідні для зменшення розмірів вихідної ДП та правильного трасування бездротового модуля, що має під собою багато щільно розташованих контактів, а це може забезпечити саме комбінований позитивний метод.

					<i>ДК62.468224.001 ПЗ</i>	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

3.2. Конструкторсько-технологічний розрахунок елементів

ДМ

Визначимо мінімальну ширину друкованого провідника по постійному струму $b_{\min I}$ (мм) для ланцюгів живлення та «землі», використовуючи вираз (3.1):

$$b_{\min I} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}}, \quad (3.1)$$

де I_{\max} – максимально можливий струм в ланцюгу, А;

$j_{\text{доп}}$ – допустима щільність струму для ДП, яка виготовлена

комбінованим позитивним методом, $j_{\text{доп}} = 48 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$;

$t_{\text{пров}}$ – товщина друкованого провідника, що визначається виразом (3.2).

Друкований провідник виготовлюється комбінованим позитивним методом. Згідно методу виготовлення:

$$t_{\text{пров}} = h_{\text{ф}} + h_{\text{зм}} + h_{\text{хм}}, \quad (3.2)$$

де: $h_{\text{ф}}$ – товщина фольги, $h_{\text{ф}} = 0,035$ (мм);

$h_{\text{зм}}$ – товщина шара гальванічно осадженої міді, $h_{\text{зм}} = 0,055$ (мм);

$h_{\text{хм}}$ – товщина шара хімічно осадженої міді, $h_{\text{хм}} = 0,0065$ (мм).

$$t_{\text{пров}} = 0,035 + 0,055 + 0,0065 = 0,0965 \text{ (мм)}$$

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

Параметр I_{max} в виразі (3.1) визначається сумою максимальних струмів, які споживають елементи. Максимальний струм споживання NRF52840, в модулі BT840, може складати до 20 мА в активному режимі (залежить від режиму роботи), беремо максимальне значення. Інші споживачі струму працюють не весь час, а активуються по необхідності. MEMS акселерометр LIS344ALH споживає 1 мА. Зовнішня Flash пам'ять споживає 5 мА. Взявши максимально можливі значення споживання елементами схеми отримаємо струм до 100 мА. Ці значення взяті для найгірших випадків з метою врахування усіх можливих режимів роботи ДВ.

$$I_{max} = 100 \text{ мА}$$

Тоді мінімальна ширина друкованого провідника на постійному струмі для ланцюгів живлення та «землі» визначається наступним чином:

$$b_{min I} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{пров}} = \frac{0,1}{48 \cdot 0,0965} = 0,02 \text{ (мм)}$$

Отримане значення мінімальної ширини провідника $b_{min I} = 0,02 \text{ (мм)}$ менше мінімального провідника обраного 4 класу точності ($b_{np}^r = 0,15 \text{ мм}$). Навіть при використанні найтоншого можливого провідника він витримає максимальне навантаження.

Визначимо мінімальну ширину провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому за виразом (3.3):

$$b_{min U} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{U_{доп} \cdot t_{пров}} \quad (3.3)$$

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		32

де: ρ – питомий опір провідника, виготовленого комбінованим позитивним методом, $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

$L_{\text{пров}}$ – довжина найдовшого друкованого провідника ДП (ланцюг «СІК»), $L_{\text{пров}} = 42(\text{мм})$;

$U_{\text{дон}}$ – допустиме падіння напруги на друкованому провіднику, $U_{\text{дон}} = 0,05 \cdot E_n$,

$$U_{\text{дон}} = 0,05 \cdot 3,3 = 0,165 \text{В};$$

$$b_{\text{min } U} = \frac{0,0175 \cdot 0,42 \cdot 0,42}{0,0965 \cdot 0,165} = 0,1(\text{мм})$$

Номінальний діаметр монтажного отвору визначається за виразом:

$$d \geq d_{\text{еe}} + \Delta d_{\text{мо}} + r, \quad (3.4)$$

де $d_{\text{еe}}$ – діаметр виводу елементів, для якого визначається діаметр монтажного отвору;

$\Delta d_{\text{мо}}$ – нижнє граничне відхилення від номінального діаметру МО (монтажний отвір), $\Delta d_{\text{мо}} = 0,1 \text{мм}$;

r – різниця між мінімальним діаметром МО та максимальним діаметром виводу елемента, $r = 0,1 \dots 0,2 \text{мм}$.

$$d \geq d_{\text{еe}} + \Delta d_{\text{мо}} + r = 1,1 + 0,1 + 0,2 = 1,3 \text{мм}$$

Визначимо діаметр контактної площини:

$$D_{\text{min}} = D_{\text{min1}} + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03, \quad (3.5)$$

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

де $D_{\min 1}$ – мінімальний ефективний діаметр КМ (контактний майданчик), (мм);

h_{ϕ} – товщина фольги, $h_{\phi} = 0,035$ мм.

Коефіцієнт $1,5 \cdot h_{\phi}$ враховує підтравлювання фольги друкованого провідника у ширину;

0,03 – КМ виготовлюють комбінованим позитивним методом.

$$D_{\min 1} = 2 \cdot \left(b_{no} + \frac{d_{\max}}{2} + \delta_0 + \delta_{км} \right), \quad (3.6)$$

де: d_{\max} – максимальний діаметр отвору в ДП, (мм);

b_{no} – ширина пояса КМ, $b_{no} = 0,05$ (мм) (табл. 3.1);

δ_0 – похибка розташування центру отвору відносно вузла КС, $\delta_0 = 0,07$ (мм) (табл. 3.2);

$\delta_{км}$ – похибка розташування центру КМ відносно вузла КС, $\delta_{км} = 0,05$ (мм) (табл. 3.2).

Максимальний діаметр отвору ДП:

$$d_{\max} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15), \quad (3.7)$$

де d – номінальний діаметр МО, (мм);

Δd – допуск на діаметр отвору, $\Delta d = 0,05$ (мм).

$$d_{\max} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15) = 1 + 0,05 + 0,1 = 1,15 \text{ мм};$$

$$D_{\min 1} = 2 \cdot \left(b_{no} + \frac{d_{\max}}{2} + \delta_0 + \delta_{км} \right) = 2 \cdot \left(0,05 + \frac{1,15}{2} + 0,07 + 0,05 \right) = 1,49 \text{ мм}$$

;

$$D_{\min} = D_{\min 1} + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 = 1,49 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,57 \text{ мм};$$

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		34

Максимальний діаметр КМ:

$$D_{\max} = D_{\min} + 0,02, \quad (3.8)$$

$$D_{\max} = D_{\min} + 0,02 = 1,57 + 0,02 = 1,59 \text{ мм}$$

Мінімальна ширина провідника визначається за виразом (3.9):

$$b_{\min} = b_{np}^r + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03, \quad (3.9)$$

де b_{np}^r – мінімальна ширина провідника. Визначаємо з таблиці класів точності (табл. 3.1). Для 4-го класу точності ДМ $b_{np}^r = 0,15 \text{ мм}$;

$$b_{\min} = b_{np}^r + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 = 0,15 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 0,23 \text{ мм}$$

Максимальна ширина провідника:

$$b_{\max} = b_{\min} + 0,02, \quad (3.10)$$

$$b_{\max} = b_{\min} + 0,02 = 0,25 \text{ мм}$$

Мінімальна відстань між провідником та контактною площиною (рис. 3.1) визначається за виразом (3.11):

$$l_{ПКМ \min} = L_0 - \left(\frac{D_{\max}}{2} + \delta_{км} + \frac{b_{\max}}{2} + \delta_{сн} \right), \quad (3.11)$$

де L_0 – відстань між центрами отворів та друкованим провідником, які кратні кроку КС, $L_0 = 1,25$ (мм);

D_{\max} - максимальний діаметр КП;

b_{\max} - максимальна ширина провідника;

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		35

$\delta_{км}$ - похибка розташування центра КП відносно вузла КС,
 $\delta_{км}=0,05$ (мм) (табл. 3.2);

$\delta_{сн}$ - похибка, яка враховує зміщення провідника, $\delta_{сн}=0,05$
 (мм).

$$l_{ПКМ \min} = L_0 - \left(\frac{D_{\max}}{2} + \delta_{км} + \frac{b_{\max}}{2} + \delta_{сн} \right) =$$

$$= 1,25 - \left(\frac{2}{2} + 0,05 + \frac{0,25}{2} + 0,05 \right) = 0,025 \text{ мм}$$

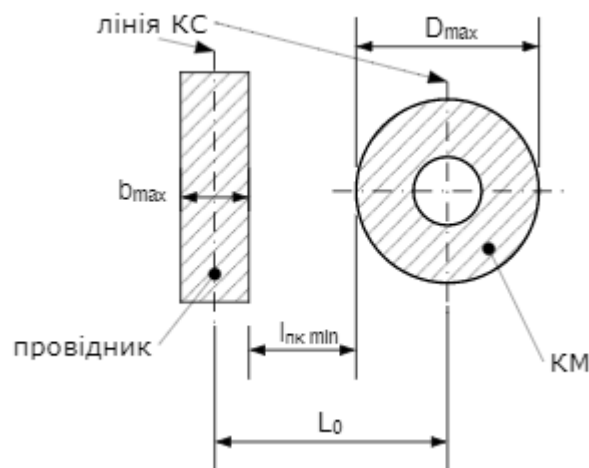


Рис. 3.1 — Контактна площа та провідник [13]

Визначимо мінімальну відстань між двома сусідніми провідниками (рис. 3.2) за виразом (3.12):

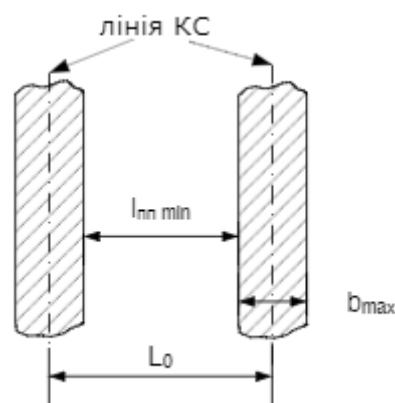


Рис. 3.2 — Відстань між сусідніми провідниками [13]

$$l_{ПП \min} = L_0 - (b_{\max} + 2 \cdot \delta_{сн}), \quad (3.12)$$

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

$$l_{III \min} = L_0 - (b_{\max} + 2 \cdot \delta_{cn}) = 1,25 - (0,25 + 2 \cdot 0,05) = 0,9 \text{ мм}$$

Визначимо мінімальну відстань між двома контактними площинами:

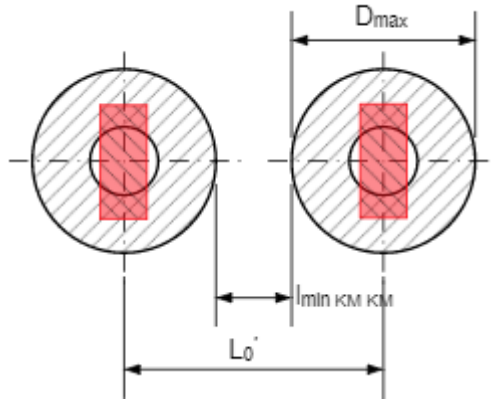


Рис. 3.3 — Відстань між двома сусідніми КП [13]

$$l_{\min_{км_км}} = L_0 - (D_{\max} + 2 \cdot \delta_{км}), \quad (3.13)$$

де L_0 - відстань між центрами сусідніх КП, $L_0=2,5$ (мм).

$$l_{\min_{км_км}} = L_0 - (D_{\max} + 2 \cdot \delta_{км}) = 2,5 - (2 + 2 \cdot 0,05) = 0,4 \text{ мм}$$

Отримані значення задовольняють 4-й клас точності із запасом, тому виконання ДП за 4-м класом точності є можливим.

3.3 Електричний розрахунок ДП

Падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику визначається за виразом (3.14):

$$U_{пад} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot l_{np}}{b_{np} \cdot t_{np}}, \quad (3.14)$$

l_{np} – максимальна довжина друкованого провідника (ланцюг «тактування Flash»), $l_{np} = 0,42$ (мм);

t_{np} – товщина провідника, $t_{np} = 0,0965$ (мм);

I_{max} – максимальний струм у провіднику, $I_{max} = 1$ мкА.

$$U_{пад} = \frac{\rho \cdot I_{npmax}}{b_{np} \cdot t_{np}} = \frac{0,0175 \cdot 0,42 \cdot 0,42}{0,035 \cdot 0,0965} = 0,02 \text{ В}$$

Потужність втрат двосторонньої ДП визначається за виразом (3.15):

$$P_{пот} = 2\pi f C E_n^2 \cdot \text{tg}\sigma \quad (3.15)$$

де $f = 1$, тому що розрахунок виконується на постійному струмі;
 $\text{tg}\sigma$ – тангенс кута діелектричних втрат для матеріалу ДП, $\text{tg}\sigma = 0,002$ для матеріалу FR4;

C – ємність ДП.

$$C = \frac{0,009 \cdot \varepsilon \cdot S_m}{h}, \quad (3.16)$$

де ε – діелектрична проникність, $\varepsilon = 4,5$ для FR4;

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		38

S_m - площа металізації (сума усіх довжин провідників, помножена на товщину провідника), (мм)²;

h - товщина ДП, (мм).

$$P_{\text{пот}} = 2\pi f C E_n^2 \cdot \text{tg}\sigma = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 25,191 \cdot 25 \cdot 0,002 = 7,9 \text{ нВт}$$

Визначимо за виразом (3.17) ємність двох сусідніх провідників, розташованих на одному шарі (мають однакову ширину) за виразом (3.17):

$$C = 0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{\text{пр}} \cdot \left(\lg \frac{2S}{b_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пр}}} \right)^{-1}, \quad (3.17)$$

де S – відстань між двома паралельними провідниками, (мм);

$b_{\text{пр}}$ - ширина друкованого провідника, (мм);

$t_{\text{пр}}$ - товщина друкованого провідника, (мм);

$l_{\text{пр}}$ - довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників, (мм).

$$C = 0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{\text{пр}} \cdot \left(\lg \frac{2S}{b_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пр}}} \right)^{-1} = 0,12 \cdot 4,5 \cdot 14 \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 0,5}{0,35 + 0,096} \right) = 10,5 \text{ пФ}$$

Визначимо індуктивність двох паралельних провідників однакової довжини за виразом (3.18):

$$M = 0,02 \left(l_{\text{пр}} \lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 - L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 - L_0^2} + l_{\text{пр}} \right), \quad (3.18)$$

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		39

де l_{np} – довжина перекриття паралельних провідників, см;

L_0 – відстань між осьовими лініями двох паралельних провідників, см.

$$M = 0,02 \left(l_{np} \lg \frac{\sqrt{l_{np}^2 - L_0^2} + l_{np}}{L_0} - \sqrt{l_{np}^2 - L_0^2} + l_{np} \right) =$$
$$= 0,02 \left(2,5 \cdot \lg \frac{\sqrt{6,25 - 0,0156} + 2,5}{0,125} - \sqrt{6,25 - 0,0156} + 2,5 \right) = 0,79 \text{ нГн}$$

Отримане значення падіння напруги на найдовшому провіднику (в даному випадку на ланцюзі «+3,3V») при максимальному струмі знаходиться у допустимих межах. Потужність втрат дорівнює 7,9 нВт, що теж є допустимим значенням. Паразитні ємності та індуктивності 10,5 нФ та 0,79 нГн відповідно також не впливають на роботу друкованого вузлу. Виконання розглянутих розрахунків дає змогу підтвердити коректну роботу друкованого вузла при запропонованому трасуванні провідників.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

3.4 Розрахунок надійності

Надійність – загальна властивість зберігати необхідні параметри протягом заданого часу під дією зовнішніх чинників. Для визначення загальної надійності пристрою потрібно розглянути систему з'єднання компонентів. Час напрацювання на відмову доволі точно дозволяє розрахувати надійність в залежності від умов використання. Інтенсивність відмов дозволяє оцінити ймовірність безвідмовної роботи пристрою в певний момент часу і дорівнює:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.19)$$

Знаючи $f(t)$ та $\lambda(t)$, можна визначити інші кількісні характеристики надійності протягом часу від 0 до t , ймовірність відмови дорівнює:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (3.20)$$

Важлива характеристика надійності - середній час безвідмовної роботи визначається:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}, \quad (3.21)$$

Інтенсивність відмов ЕРЕ є їх вихідною характеристикою надійності, залежить від режиму роботи та впливу зовнішніх впливів таких як температура, тепловий удар, вологість, вібрації тощо.

Тоді можна записати:

$$\lambda_e = \lambda_{0e} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n, \quad (3.22)$$

де λ_{0e} - інтенсивність відмов елементу при нормальних умовах роботи (температура навколишнього середовища $T_{навл.сер.} = (20 \pm 5)^\circ\text{C}$, відносна вологість $(65 \pm 15)\%$);

Коефіцієнт електричного навантаження $K_n = 1, K_1, K_2 \dots K_n$ - коригуючі коефіцієнти, що враховують режими роботи та умови експлуатації.

Для врахування впливу режиму роботи на інтенсивність відмов ЕОА вводять коефіцієнт навантаження, який дорівнює відношенню навантаження в робочому режимі до навантаження в номінальному режимі:

$$K_n = \frac{H_{роб}}{H_{ном}}, \quad (3.23)$$

Розраховуємо значення коефіцієнтів навантаження:

1. Для резисторів:

$$K_{н.р.} = \frac{P_{роб}}{P_{ном}} = \frac{U_{роб}^2}{R \cdot P_{роб}}, \quad (3.24)$$

Але резистори, в створеній схемі, знаходяться в модулі і дізнатись їх номінал, потужність та інші параметри неможливо.

2. Для конденсаторів:

$$K_{н.р.} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}}, \quad (3.25)$$

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		42

У схемі використовуються усі конденсатори з номінальною напругою 50 В, тому:

C1

$$K_{н.р.} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}} = \frac{3,3}{6,3} = 0,52$$

C2

$$K_{н.р.} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}} = \frac{3,3}{10} = 0,33$$

C3, C5

$$K_{н.р.} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}} = \frac{3,3}{6,3} = 0,52$$

C4, C6

$$K_{н.р.} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}} = \frac{3,3}{16} = 0,20$$

Визначимо результуючу інтенсивність відмов друкованого вузлу. Друкований вузол відноситься до наземної апаратури, експлуатується при максимальній $T_p = 60^\circ\text{C}$, інші умови експлуатації нормальні. Вихідні дані для розрахунку λ_p – схема електрична принципова, перелік елементів, часова діаграма та інтенсивність відмов «компонентів надійності» від температурних впливів.

Результуюча інтенсивність відмов дорівнює сумі інтенсивності відмов компонентів:

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{pi}, \quad (3.26)$$

За схемою електричною принциповою складаємо карту робочих режимів. По картам робочих режимів визначаємо коефіцієнти навантаження, температурні коефіцієнти ІС та інших компонентів, рахуємо кількість всіх елементів. Вихідні дані для визначення λ_p зведено до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 — Вихідні дані для визначення λ_p

Компонент	N	$\lambda_{0e} \cdot 10^{-8},$ $год^{-1}$	K_H	α_t	a_e	$N \cdot \lambda_{0e} \cdot$ $K_H \cdot \alpha_t \cdot a_e \cdot 1$ 0^{-8}
Конденсатор						
C1		2	0,52	0,4	20	8,32
C2		2	0,33	0,4	20	5,28
C3, C5		2	0,52	0,4	20	8,32
C4, C6		2	0,2	0,4	20	3,2
ІС	4	1	1	1	20	80
Друкована плата	2	10	1	1	20	400
Контакт роз'єму	8	2	1	1	20	320
Пайка виводів	113	0,05	1	1	20	113
	Сумарна інтенсивність відмов друкованого вузла					938,12

a_e - коригуючий коефіцієнт на вплив зовнішніх впливів (для переносної апаратури $a_e = 20$);

α_t - коригуючий температурний коефіцієнт.

Показники інтенсивності відмов, що наведені в табл. 3.3, дещо завищені, дозволяють виконати розрахунок для «найгіршого випадку».

Розрахуємо результуючу інтенсивність відмов за виразом (3.27):

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} \approx 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

Середній час напрацювання до першої відмови (3.28):

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{2,4 \cdot 10^{-5}} = 45400 \text{ год}$$

Ймовірність безвідмовної роботи протягом року (3.29):

$$P = e^{-\lambda_p t} = e^{-2,4 \cdot 10^{-5} \cdot 8760} \approx 0,81$$

Ймовірність відмов протягом року (3.30):

$$Q(t) = 1 - 0,81 = 0,19$$

Виконаний розрахунок основних показників надійності друкованого вузла дозволяє оцінити його показники надійності, час напрацювання на відказ. Даний розрахунок є неточним, бо не враховуються поправочні коефіцієнти для сучасних ІМС. Також розрахунок здійснювався для усіх компонентів з постійним навантаженням, а у реальному застосуванні усі компоненти не будуть застосовуватися одночасно або у режимі максимального споживання.

Отримані значення:

- середній час напрацювання до першої відмови:

$$T_{cp} = 45400 \text{ год}$$

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		45

- ймовірність безвідмовної роботи протягом року:

$$P=0,81$$

- ймовірність відмови протягом року

$$Qt=0,19$$

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		46

Висновки за розділом 3

Для виготовлення ДП обрано матеріал FR4-2-35-1,5, властивості якого дозволять при невеликій собівартості покращити вихідні параметри та надійність. Для отримання задовільної щільності монтажу використовується ДДП з металізацією певних перехідних отворів. Виготовлення ДДП буде виконуватись за позитивним комбінованим методом. Використання елементів з малими за розмірами КП та висока щільність трасування, при використанні вже готового бездротового модуля обґрунтовано дало вибір 4-го класу точності виготовлення ДП.

Конструкторсько-технологічні розрахунки визначили можливість застосування 4 класу точності при виготовленні розробленої ДП.

Результати електричного розрахунку також підтверджують допустимість виготовлення плати за 4-м класом точності: ємність та індуктивність провідників не мають впливу на роботу пристрою, а падіння напруги на найдовшому провіднику настільки мале, що має значення близькі до метрологічної похибки вимірювальних приладів.

Розрахунок надійності показав, що час напрацювання на відмову складає близько 45400 годин, що відповідає більш ніж 5 рокам неперервної роботи. При цьому ймовірність відмови у перший рік експлуатації складає 19%. В даній роботі не було проведено розрахунків на поступовий вихід пристрою з ладу, а лише на раптовий, оскільки в умовах використання пристрою на виробничих підприємствах є безліч показників, які потрібно врахувати.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		47

Збільшити надійність друкованого вузла, та пристрою в цілому, можна з використанням наступних заходів:

- Зміна певних компонентів на більш промислові аналоги;
- метрологічний контроль кожного з елементів та перевірка ДП на працездатність після тестових деформацій;
- зменшення числа перехідних отворів;
- використання спеціалізованих бездротових модулів для застосування в екстремальних умовах.

Загальний вигляд розробленої ДП наведено нижче (рис3.5.1)

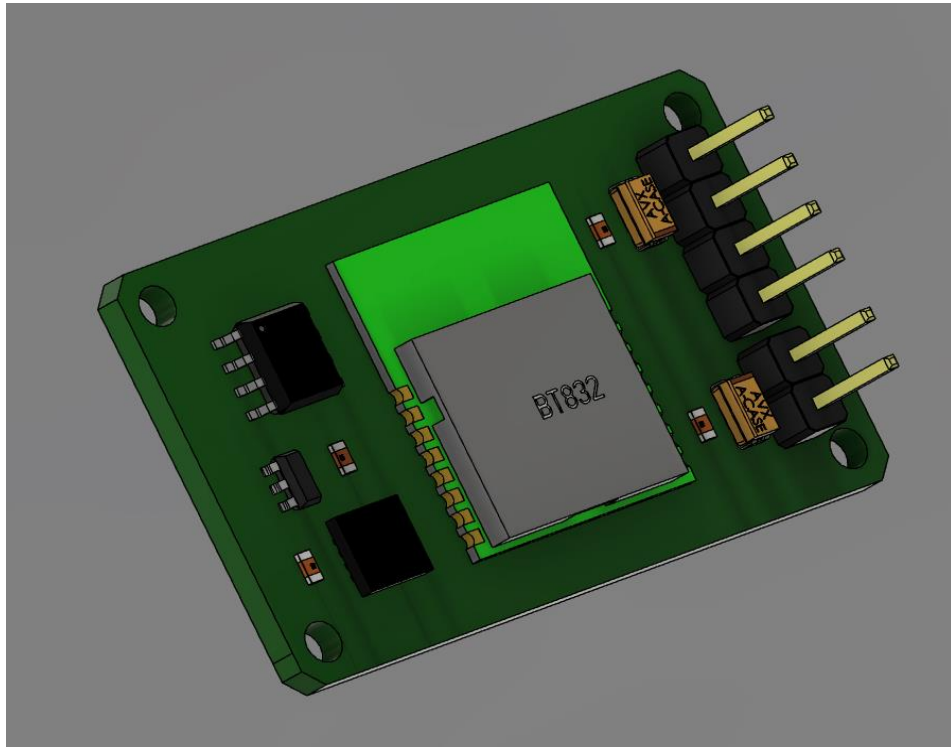


Рисунок 3.5.1. Зовнішній вигляд розробленої ДП

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНИХ РІШЕНЬ, СЕРВЕРНА ЧАСТИНА

4.1 Особливості внутрішньої структури мікроконтролера.

Створення сучасних пристроїв з використанням стандартизованих бездротових протоколів передачі інформації несе в собі одну важливу проблему: відсутність відкритих бібліотек для роботи з ними на низькому абстрактному рівні. Розглянуті в даній роботі рішення від інших компаній, при аналізі ринку та вибору елементної бази, теж мають таку проблему: відсутність відкритого коду для роботи з бездротовою частиною периферії мікроконтролера. Використаний в даній роботі мікроконтролер NRF52840 теж має цю проблему. Структура коду в його внутрішній пам'яті зображена на рисунку 4.1.1.

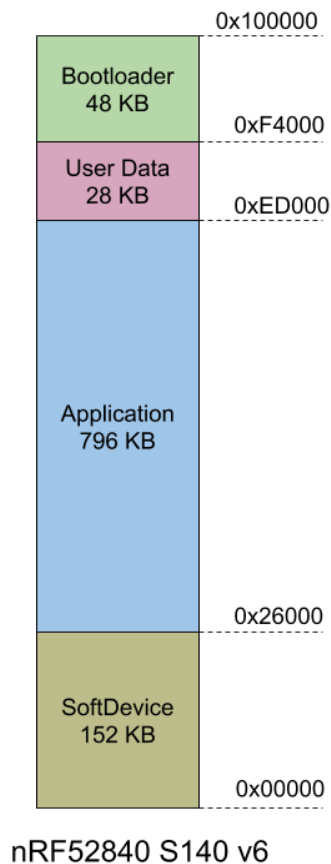


Рисунок 4.1.1. Структура коду в мікроконтролері NRF52840

Лінковка коду в даному типі мікроконтролерів дуже важлива, оскільки він має прямі залежності регістрів бездротової периферії, в які можливий запис. Без правильної лінковки це може призвести до виходу мікроконтролера з ладу. Така проблема впливає із рішення компанії Nordic Semiconductor у використанні лише одного обчислювального ядра. Cortex M4F, як видно з рисунку 4.1.2, керує не лише периферійними блоками, але й бездротовою частиною.

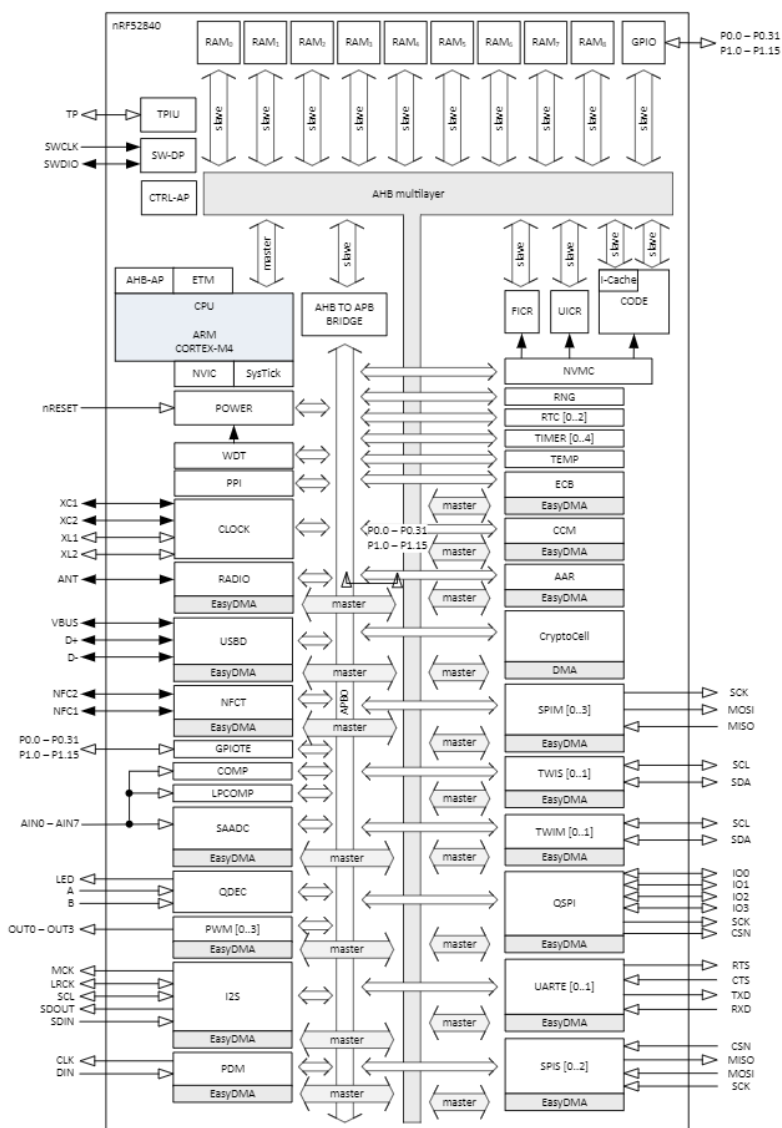


Рисунок 4.1.2. Внутрішня структура мікроконтролера NRF52840

Кінцевим висновком є унеможливлення написання низькорівневого коду для максимального задіяння всіх можливостей даного мікроконтролера та з'являється потреба у використанні певного рівня абстракції коду, який надає виробник – SoftDevice, що йде в комплекті з загальним деревом Software Development Kit.

Виробник пропонує певний набір бібліотек для роботи з блоками периферії, відкидаючи необхідність праці з регістрами мікроконтролера. Це дуже зручно, особливо у використанні з операційною системою реального часу, що є ще одним вимушеним рішенням, у зв'язку з лише одним обчислювальним ядром.

Всі ці особливості впливають на внутрішню ієрархію коду(рис 4.1.3), що буде містити в собі SDK, SoftDevice, FreeRTOS та HAL.

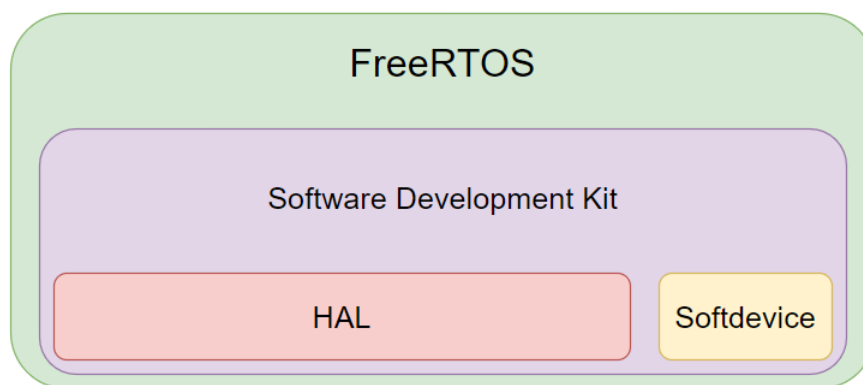


Рисунок 4.1.3. Внутрішня ієрархія програмних структур

4.2 Огляд програмних компонентів розробки.

Інтегроване середовище розробки – це набір компонентів, інструментів для розробки програмного забезпечення. Типове середовище розробки включає:

- редактор програмного коду;
- компілятор та/або інтерпретатор;
- засоби автоматизації збірки продукту;
- відладчик.

Ще однією особливістю даного мікроконтролера є можливість програмування лише засобами від компанії Segger. Для переносу коду в пам'ять використовується програматор J-Link. Для роботи з даним програматором було використано ПЗ Segger J-Flash, що необхідне для правильної лінковки коду в мікроконтролері. Компілятор, в даному випадку – GCC. Для розробки демонстраційного програмного забезпечення було обрано інтегроване середовище розробки VSCode (рис 4.2.1).

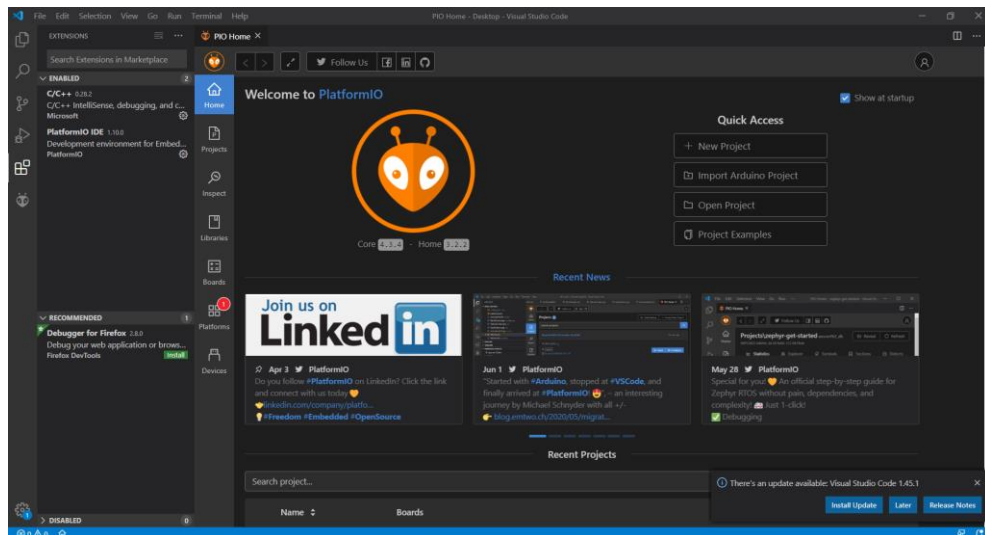


Рисунок 4.2.1. Зовнішній вигляд середовища VSCode.

						Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат	ДКО1.468213.001 ПЗ	

VSCode є інтегрованим середовищем розробки з підтримкою системи контролю версій Git, та засобами IntelliSense. Підтримка мов програмування, засобів налагодження, додаткових інструментів профілювання здійснюється за допомогою розширень, що можуть бути встановлені з магазину додатків Microsoft.

При розробці вбудованого програмного забезпечення на базі процесорів Cortex-M використовуються наступні розширення:

- C/C++ plugin;
- CMake;
- CMake Tools;
- Cortex-Debug.

Розглянемо кожний плагін в окремоті. C/C++ – плагін, який додає підтримку мов програмування C та C++. У підтримку входять автодоповнення програмного коду, засоби налагодження, інструментарій IntelliSense. CMake – додає підтримку CMake language, що використовується для крос-платформної компіляції проекту. CMake Tools – додатковий інструментарій CMake, що дозволяє конфігурувати проект, завантажувати прошивку до пристрою, запускати компіляцію проекту. Cortex-Debug – плагін для підтримки налагодження процесорів з архітектурою Cortex. Конфігурація плагіну здійснюється за допомогою JSON-файлів. Як основну мову програмування для реалізації проекту було обрано останній доступний стандарт мови програмування C++, а саме C++17.

4.3. Інструменти для розробки демонстраційного програмного забезпечення.

Для перевірки працездатності побудованої схеми було використано NRF52 DK (рис 4.3.1), що являє собою платформу для розробки, яка містить в собі мікроконтролер NRF5240, програматор J-Link OB, всю необхідну обв'язку для використання мікроконтролера у всіх можливих його режимах включення та кілька світлодіодів з кнопками в якості простої периферії.

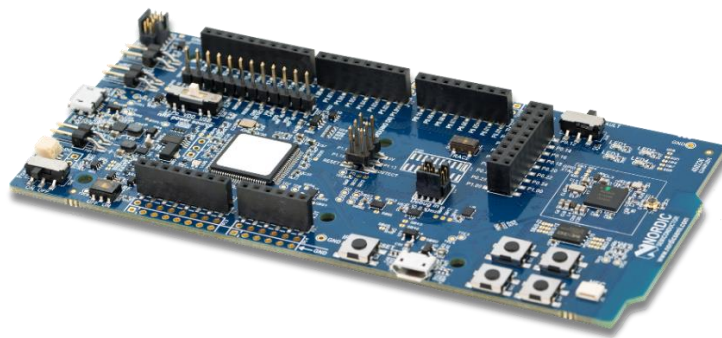


Рисунок 4.3.1. Зовнішній вигляд платформи NRF52 DK

Для перевірки бездротової частини було написано код, наведений в Додатку Г, інформація з якого, для тестування, приймалась на BLE монітор від компанії Nordic Semiconductor (рис 4.3.2).

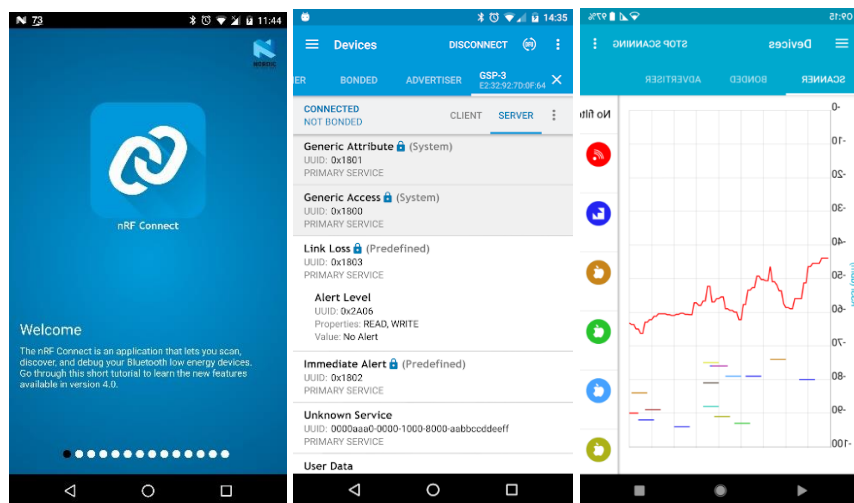


Рисунок 4.3.2. BLE монітор від Nordic Semiconductor

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

4.4. Розробка алгоритму дії демонстраційного програмного забезпечення.

Основою роботи даного пристрою є реєстрація та аналіз вібрацій, знятих за допомогою аналогового акселерометру. Для цього, звісно потрібно аналізувати сигнал, знятий за допомогою АЦП.

Для початку нам потрібно усунути можливий вплив земної сили тяжіння на пристрій, оскільки MEMS акселерометри мають негативну властивість до статичних показників позиціонування в просторі (рис 4.4.1). Для цього достатньо при ввімкненні пристрою (під час його монтування) провести автоматичне калібрування, а початкові значення сигналу прийняти за позиційні, основні.

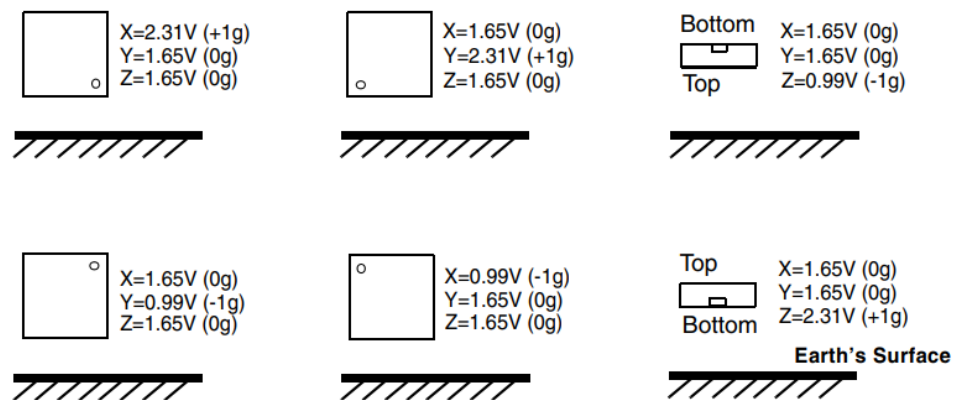


Рисунок 4.4.1. Вихідні статичні показники в залежності від позиціонування акселерометру в просторі

Також слід зауважити, що MEMS акселерометри мають певну нерівномірність АЧХ. Для їх усунення пропонується застосувати такий алгоритм:

1. Виміряти буфер даних, достатній для побудови спектру.
2. Виконати швидке перетворення Фур'є, виміряного буферу та знайти сплески на ньому.

3. Відкинути значення з частотами за межами вимірюваного спектру $10\text{Гц} < F < 1000\text{Гц}$ (в частотній області)
4. Визначити середньо-квадратичне значення кількох вимірів.

Сукупність даних кроків необхідна для усунення відхилення показників кожного окремого акселерометру, адже кожний окремо взятий представник буде мати свої власні відхилення, і лише після повноцінної калібровки всі пристрої будуть мати однакові показники. Для виміру віброприскорення потрібно застосувати формулу 4.1, в якій ми застосовуємо коригуючий множник лінії спектру Q_i :

$$\Lambda = \sqrt{\sum_i (a_i q_i)^2}, \quad (4.1)$$

Даний множник можна отримати лише після проведення експериментальних дослідів на повіреному вібростенді з лінійним вибором частоти вібрації. Для цього потрібно провести спектральний дослід з еталонним сенсором, після чого порівняти дані на всьому вимірюваному діапазоні у вигляді (4.2):

$$Q_i = \frac{\Lambda_{\text{Розроблений}}}{\Lambda_{\text{Еталонний}}}, \quad (4.2)$$

За відсутності даних показників було прийнято рішення в симуляції вхідних даних програмними методами, для демонстрації працездатності даного рішення. В зв'язку з цим фільтрація даних аналогового акселерометру не розглядається.

Структура програмного забезпечення, в даному випадку, має лінійний вигляд: заповнення буферу для вимірів, обчислення за швидким перетворення Фур'є з статичним вибором границь діапазону виміру, передача отриманих результатів.

Генерація семплів сигналу на платі налагодження.

Для реалізації генерації семплів вхідного сигналу потрібно визначити: частоту генерації вхідного сигналу, розмір вхідної вибірки та розмір вихідної вибірки(в два рази менший за розмір вхідної). За це відповідають відповідно константи, задані через макроси:

```
#define FFT_TEST_SAMPLE_FREQ_HZ 2000.0f
#define FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN 128
#define FFT_TEST_OUT_SAMPLES_LEN (FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN / 2)
```

Для генерації семплів та їх подальшої обробки повинно визначити відповідні масиви. Масив вхідних значень представляє собою семпли у часовій області. Після виконання FFT буде отримано вихідну вибірку в частотній області. Масиви відповідно означені як `static float32_t`:

```
m_fft_input_f32[FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN];
static float32_t m_fft_output_f32[FFT_TEST_OUT_SAMPLES_LEN];
```

Генерація вхідних семплів виконується у функції:

```
static void fft_generate_samples(float32_t * p_input, uint16_t size, float32_t
sampling_freq, float32_t sine_freq, bool add_noise)
```

параметрами якої є: показчик на масив, у який будуть записані згенеровані семпли, розмір вхідного масиву, частота дискретизації, максимальна частота синусоїдальної хвилі та

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

булевий параметр, що відповідає за додавання шуму до сигналу(амплітуда шуму задається макросом NOISE_AMPLITUDE).

Реалізація функції представляє собою генерацію двох компонент вхідного масиву, а саме дійсної та уявної частини комплексного числа. Дійсна частина представляє собою генероване значення однієї точки синусоїдальної хвилі, уявна частина дорівнює нулю

```
p_input[(uint16_t)i] = sin(sine_freq * (2.f * PI) * sample_idx / sampling_freq);
```

Реалізація функції `fft_process` представляє собою виклик відповідної функції з бібліотеки CMSIS-DSP з відповідним дескриптором перетворення, вхідним масивом даних, вихідним масивом даних та розміром вихідного буфера. У випадку використання буфера на 128 семплів (64 комплексних пари) дескриптором ШПФ буде структура `arm_cfft_sR_f32_len64`, для вибірки у 256 семплів- відповідно `arm_cfft_sR_f32_len128`. Ця структура є елементом узгодження між розмірами вхідного та вихідного буферів. Функція, що виконує ШПФ - `arm_cfft_f32`, яка аргументами приймає дескриптор вхідного буферу `p_input_struct`, вхідний масив даних, вихідний масив даних, флаг, що вказує на виконання прямого або зворотного ШПФ та флаг виконання реверсу бітів. Після виконання ШПФ над вхідним буфером виконується визначення величини для кожного отриманого біну за допомогою функції `arm_cmplx_mag_f32` який є результатом ШПФ. Аргументи функції - покажчик на вхідний буфер, покажчик на вихідний буфер, розмір вихідного буфера.

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

```

static void fft_process(float32_t *p_input, const arm_cfft_instance_f32 * p_input_struct,
float32_t *p_output, uint16_t output_size)

{

    arm_cfft_f32(p_input_struct, p_input, m_ifft_flag, m_do_bit_reverse);

    arm_cmplx_mag_f32(p_input, p_output, output_size);

}

```

Головна функція програми містить у собі наступні виклики: встановлення режиму генерації шуму до вхідного сигналу, виклик генерації семплів вхідного сигналу, обробку вхідного буферу ШПФ, малювання заголовку для виводу у термінал та виводу даних, отриманих у результаті виконання ШПФ.

Функція виводу заголовку виводить частоту генерованого масиву семплів та наявність шуму у генерованому сигналі. Для малювання графіку у терміналі функція виконує пошук найбільшого значення у вихідному буфері за допомогою arm_max_f32, після чого виконує порядковий вивід отриманих результатів, виводячи у термінал | або символ пробілу в залежності від поточного значення, що обробляється.

В залежності від режиму роботи FPU (режим опитувань або режим переривань)виконується встановлення пріоритету переривання FPU у NVIC, очищення відповідного флагу та ввімкнення відповідного переривання. Також, у випадку роботи з перериваннями FPU слід зазначити необхідність очистки регістру FPSCR та очистку очікуваних переривань FPU.

Це необхідна частина коду, коли програма використовує режим економії енергії та після обробки помилок FPU в режимі опитування.

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Вивід у термінал виконується за допомогою сімейства функцій `NRF_LOG_XXXXX` які дозволяють гнучко конфігурувати рівень логування даних, виконувати базове форматування, виконувати очистку потоку виводу, виконувати кольоровий вивід(для терміналів та низькорівневих реалізацій логеру, що підтримують цю можливість). У даному випадку є необхідним використовувати наступні функції, `NRF_LOG_DEFAULT_BACKENDS_INIT` для ініціалізації логеру, `NRF_LOG_RAW_INFO` для виводу неформатованих рядків (задача форматування у цьому випадку покладається на користувача), та `NRF_LOG_FLUSH`, що є макросом для обробки всіх записів з буфера. Виклик `NRF_LOG_FLUSH` є блокуючим, поки всі буферизовані записи не будуть оброблені драйвером виводу.

Слід зазначити, що у вихідному масиві формується вибірка амплітуд сигналу, адже у функції, що виконує ШПФ модифікація вихідного масиву виконується лише під час обчислення `magnitude` у нього. Розмір вхідного буферу- 128 семплів, розмір вихідного буферу – поділений навпіл розмір вхідного. На отриманому у консолі результаті спостерігається явище, що називається "відзеркалення спектру" [14], природою якого є неоднозначність представлення сигналу як суми гармонік для відтворення початкової функції сигналу (рисунок 4.4.2). Це є особливістю алгоритму ШПФ.

					<i>ДК01.468213.001 ПЗ</i>	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

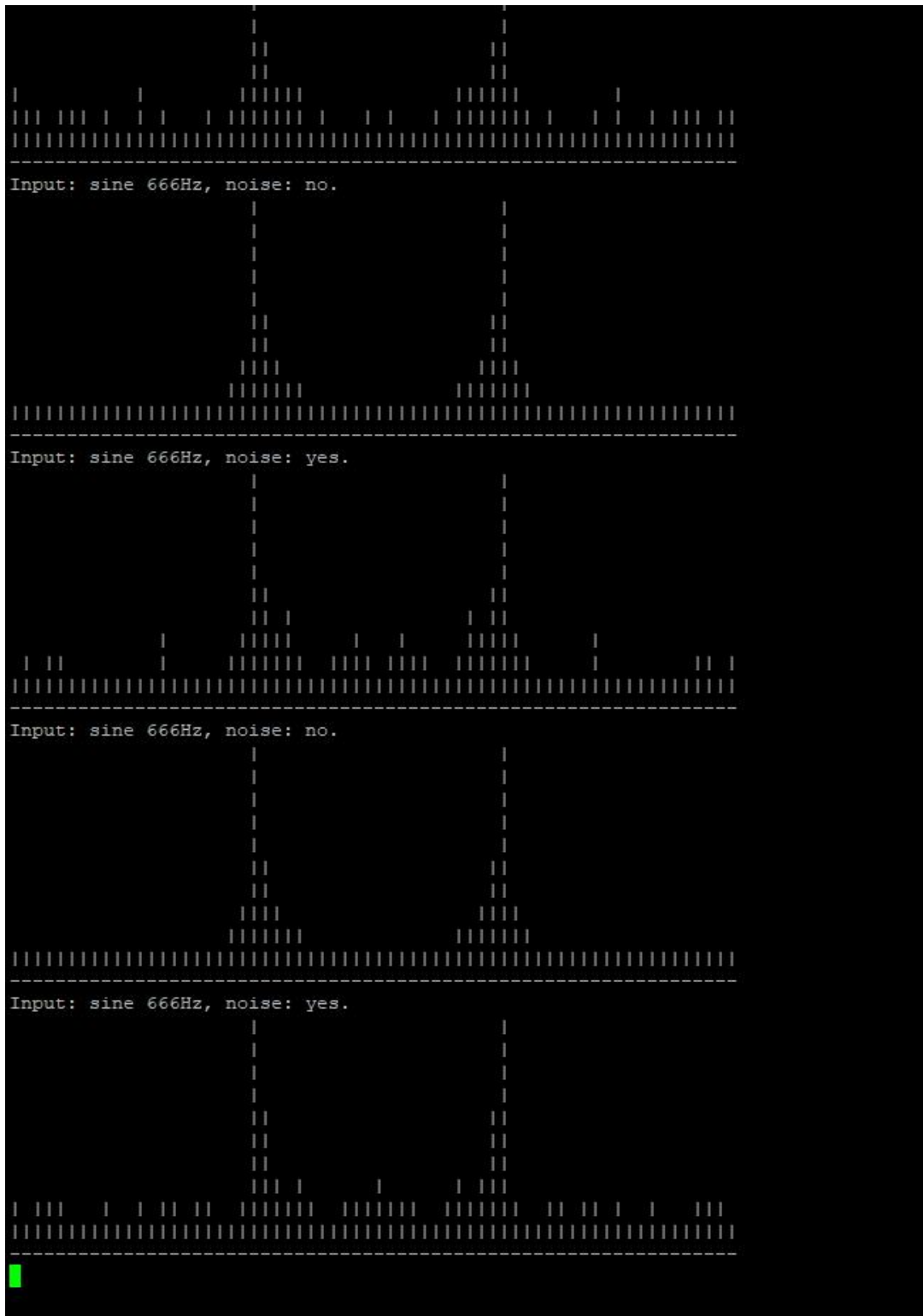


Рисунок 4.4.2. Отриманий результат в моніторі послідовного порту при моделюванні вхідного сигналу в 666 Гц.

Висновки за розділом 4

Сучасні мікроконтролери вже зовсім не схожі на своїх попередників. Вони дозволяють запускати на собі не лише складні програми, а повноцінні операційні системи реального часу, з реалізацією справді складних та часово-залежних задач. Новітні SoC дають неабиякий простір для створення різноманітних комплексних пристроїв з мережевими можливостями, що були доступні лише для старший видів протоколів: Wi-Fi, Sub 1Ghz та інші.

Використання інтегрованих середовищ для розробки коду дуже спрощують програмування та відладку, що є досить складними процесами.

Робота з цим розділом допомогла не лише створити програмне забезпечення та перевірити працездатність схемотехнічних рішень, але й дала мені можливість вивчити сучасні програмні рішення для побудови бездротових пристроїв загального вжитку.

					ДК01.468213.001 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прогнозування збоїв за допомогою моніторингу Texas Instrument [Електронний ресурс] – Режим доступу:
https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2018/04/19/predicting-failures-with-condition-monitoring
2. Скачок в індустріалізацію 4.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://www.eetimes.com/jumping-into-industry-4-0-with-predictive-maintenance-solutions/>
3. Центр професійних компетенцій ТОиР [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://toir.pro/mod/glossary/print.php?id=218&mode=date&hook&sortkey=UPDATE&sortorder=desc&offset=0&pagelimit=0>
4. Офіційне онлайн представництво компанії Fluke [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://www.fluke.com/en-us/product/condition-monitoring/vibration/3561-vibration-sensor>
5. Документація на мініатюрний детектор вібрації від компанії Fluke [Електронний ресурс] – Режим доступу:
https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/6011156b-en-3561FC-datasheet.pdf?fmDPFFGJ9LKjZPljPNzaB_.jopvGZmO
6. Бездротовий детектор вібрації від компанії Erbessd-instruments [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://www.erbessd-instruments.com/vibration-monitoring>
7. Рішення SimpleLink Sub 1 Ghz від компанії TI [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<http://www.ti.com/wireless-connectivity/simplelink-solutions/sub-1-ghz/overview.html>
8. Рішення SimpleLink Wi-Fi від компанії TI [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<http://www.ti.com/wireless-connectivity/simplelink-solutions/wi-fi/overview/overview.html>

									Арк.
									62
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат	ДК01.468213.001 ПЗ				

9. Аналіз бездротових рішень на базі існуючих протоколів передачі інформації [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an1142-mesh-network-performance-comparison.pdf>
10. Промислові модульні бездротові рішення на базі NRF52840 від компанії Panasonic [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://na.industrial.panasonic.com/products/wireless-connectivity/bluetooth/lineup/bluetooth-low-energy/series/128560>
11. Робота над створенням прототипу системи детектування вібрації на MEMS акселерометрах [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://www.ijser.in/archives/v2i9/SjIwMTMzNTg=.pdf>
12. Промисловий модуль BT840 від компанії Fanstel на базі NRF52840. [Електронний ресурс] – Режим доступу:
13. Губар В.Г. ФТОК. Лекція 10 [Електронний ресурс] – Режим доступу:
<https://drive.google.com/drive/folders/1sNemDAblxPpigRTBCrk3Mxa2NiEMc3mR?usp=sharinghttps://www.fanstel.com/bt840>

ГОСТ 2.743-91 Обозначения условные графические в схемах.
Элементы цифровой техники

ГОСТ 2.755-87 Устройства коммутационные и контактные соединения

ГОСТ 2.759-82 Обозначения условные графические в схемах.
Аналоговые элементы

ГОСТ 23751-86 Платы печатные. Основные параметры конструкции

ГОСТ 23752-79 Платы печатные. Общие технические условия

					ДК01.468213.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		63

Додаток Г - Лістинг програми

```
#include <stdbool.h>
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "app_util_platform.h"
#include "bsp.h"
#include "nrf_delay.h"
#include "nrf_log.h"
#include "nrf_log_ctrl.h"
#include "nrf_log_default_backends.h"
#include "arm_const_structs.h"

#define GRAPH_WINDOW_HEIGHT      10
#define FPU_EXCEPTION_MASK      0x0000009F
#define FPU_FPSCR_REG_STACK_OFF 0x40
#define FFT_TEST_SAMPLE_FREQ_HZ 2000.0f
#define FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN 128
#define FFT_TEST_OUT_SAMPLES_LEN (FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN / 2)
#define SIGNALS_RESOLUTION      100.0f
#define SINE_WAVE_FREQ_MAX      20000
#define NOISE_AMPLITUDE         1
static uint32_t m_ifft_flag      = 0;
static uint32_t m_do_bit_reverse = 1;
static float32_t m_fft_input_f32[FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN];
static float32_t m_fft_output_f32[FFT_TEST_OUT_SAMPLES_LEN];

static void fft_generate_samples(float32_t * p_input,
                                uint16_t size,
                                float32_t sampling_freq,
                                float32_t sine_freq,
                                bool add_noise)
{
    uint32_t i;
    uint32_t sample_idx = 0;
    if (2 > size)
```

```

{
    return;
}
for (i = 0; i < (size - 1UL); i += 2) {
    sample_idx = i / 2;
    // Real part.
    p_input[(uint16_t)i] = sin(sine_freq * (2.f * PI) * sample_idx / sampling_freq);
    if (add_noise)
    {

        p_input[(uint16_t)i] *= ((rand()) % ((int)(NOISE_AMPLITUDE * SIGNALS_RESOLUTION)))
            / SIGNALS_RESOLUTION;
    }
    p_input[(uint16_t)i + 1] = 0;
}
}
static void fft_process(float32_t *          p_input,
                       const arm_cfft_instance_f32 * p_input_struct,
                       float32_t *          p_output,
                       uint16_t             output_size)
{
    arm_cfft_f32(p_input_struct, p_input, m_ifft_flag, m_do_bit_reverse);
    arm_cmplx_mag_f32(p_input, p_output, output_size);
}

#ifdef FPU_INTERRUPT_MODE
void FPU_IRQHandler(void)
{
    uint32_t * fpscr = (uint32_t *) (FPU->FPCAR + FPU_FPSCR_REG_STACK_OFF);
    (void) __get_FPSCR();
    *fpscr = *fpscr & ~(FPU_EXCEPTION_MASK);
}
#endif

static void draw_line(uint16_t line_width)
{

```

```

uint32_t i;
char line[line_width + 1];

for (i = 0; i < line_width; i++)
{
    line[i] = '-';
}
line[line_width] = 0;
NRF_LOG_RAW_INFO("%s\r\n", nrf_log_push(line));
}

```

```

static void draw_fft_header(float32_t input_sine_freq, bool is_noisy)
{
    NRF_LOG_RAW_INFO("Input: sine %uHz, noise: %s.\r\n", (uint16_t)input_sine_freq,
        (uint32_t)((is_noisy == true) ? "yes" : "no"));
}

```

```

static void draw_fft_data(float32_t * p_input_data, uint16_t data_size, uint16_t chart_height)
{
    uint32_t graph_y, graph_x;
    float32_t curr_drawing_val;
    float32_t curr_percent;
    float32_t max_value;
    uint32_t max_val_index;
    char tmp_str[data_size + 1];

    arm_max_f32(p_input_data, data_size, &max_value, &max_val_index);

    for (graph_y = chart_height; graph_y > 0; graph_y--)
    {
        curr_percent = ((graph_y - 1) / (chart_height * 1.f));
        curr_drawing_val = max_value * curr_percent;
        for (graph_x = 0; graph_x < data_size; graph_x++)

```

```
{
    if (m_fft_output_f32[graph_x] > curr_drawing_val)
    {
        tmp_str[graph_x] = '|';
    } else
    {
        tmp_str[graph_x] = ' ';
    }
}
tmp_str[data_size] = 0;
NRF_LOG_RAW_INFO("%s\r\n", NRF_LOG_PUSH(tmp_str));
NRF_LOG_FLUSH();
}
```

```
draw_line(data_size);
```

```
}
```

```
int main(void)
```

```
{
```

```
uint32_t err_code;
```

```
bool noise = false;
```

```
float32_t sine_freq;
```

```
err_code = NRF_LOG_INIT(NULL);
```

```
APP_ERROR_CHECK(err_code);
```

```
NRF_LOG_DEFAULT_BACKENDS_INIT();
```

```
// Welcome message.
```

```
NRF_LOG_INFO("FPU FFT example started.");
```

```
NRF_LOG_RAW_INFO("This is FPU usage example with FFT calculation and drawing.\r\n");
```

```

#ifdef FPU_INTERRUPT_MODE
    NVIC_SetPriority(FPU_IRQn, APP_IRQ_PRIORITY_LOWEST);
    NVIC_ClearPendingIRQ(FPU_IRQn);
    NVIC_EnableIRQ(FPU_IRQn);
#endif

for (;;)
{
    noise = !noise;
    sine_freq = 666;
    fft_generate_samples(m_fft_input_f32,
                        FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN,
                        FFT_TEST_SAMPLE_FREQ_HZ,
                        sine_freq, noise);

    fft_process(m_fft_input_f32,
                &arm_cfft_sR_f32_len64,
                m_fft_output_f32,
                FFT_TEST_OUT_SAMPLES_LEN);

    draw_fft_header(sine_freq, noise);
    draw_fft_data(m_fft_output_f32, FFT_TEST_OUT_SAMPLES_LEN, GRAPH_WINDOW_HEIGHT);

    NRF_LOG_FLUSH();

#ifdef FPU_INTERRUPT_MODE
    __set_FPSCR(__get_FPSCR() & ~(FPU_EXCEPTION_MASK));
    (void) __get_FPSCR();
    NVIC_ClearPendingIRQ(FPU_IRQn);
#endif
    nrf_delay_ms(1000);
}

```

АНОТАЦІЯ

Безпроводна система моніторингу вібрацій для прогнозованого обслуговування електродвигунів // Дипломний проект. Гордієнко Я.О. «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури, група ДК-62. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020. – С. – 66, табл. – 5, креслень – 3, бібліографічних найменувань – 13.

Дипломний проект вирішує задачу схемотехнічного проектування модуля для побудови бездротової системи моніторингу вібрацій для прогнозованого обслуговування електродвигунів та його програмування. Даний пристрій забезпечує реєстрацію та попередній аналіз вібрацій, реалізацію сітчастої мережі на базі протоколу BLE (можлива реалізація на ZigBee та Thread протоколах) та зберігання повноцінного денного датасету інформації в пристрої.

У проекті проведено аналіз існуючих рішень реєстрації та аналізу вібрацій, розглянуто BLE SoC NRF52840, його мережеві та апаратні можливості, розроблено схемотехнічне рішення та демонстраційне програмне забезпечення. Був виконаний конструктивно-технологічний розрахунок для розробки друкованої плати пристрою та обчислено експлуатаційні показники. Структура проекту представлена вступом, 4 розділами, висновками, списком використаних джерел та додатками.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: BLE, SOC, PREDICTIVE MAINTENANCE, IOT, VIBRATION ANALYSIS, NORDIC SEMICONDUCTOR, NRF52840.

ABSTRACT

Wireless vibration's monitoring system for predictive maintenance of electric motors // Graduation Project. Hordiienko Y. O. 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Faculty of Electronics, The Department of Electronic and Computing Equipment Engineering, DK-62. – K.: 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', 2020. – pages – 66, table – 5, technical drawings – 3, bibliographic names – 13.

A Graduation Project deals with the question of module's circuitry design for making a wireless vibration's monitoring system for predictive maintenance of electric motors and for its programming. This device ensures the registration of vibrations and their preliminary analysis, the realization of mesh network based on BLE protocol (also the realization is possible on ZigBee protocol and Thread protocol) and the conservation of full information's dataset in the device.

In this Project the existed solutions' registrations were analyzed, BLE SoC NRF52840 was considered with its network and hardware capabilities, the circuitry solution and demoware were developed. The structural and technical calculations for a device's printed circuit board were done and the performance indicators were calculated. The structure of Project is embodied with Introduction, 4 Chapters, Conclusions, List of Reference Sources, Annexes.

KEY WORDS: BLE, SOC, PREDICTIVE MAINTENANCE, IOT, VIBRATION ANALYSIS, NORDIC SEMICONDUCTOR, NRF52840..

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ADC (АЦП) – Аналого-Цифровий Перетворювач.

ДМ – Друкований Монтаж.

ДП – Друкована Плата.

ОДП – Одношарова Друкована Плата.

ДДП – Двостороння Друкована Плата.

БДП – Багатошарова Друкована Плата.

КМ – Контактний Майданчик.

КП – Контактна Площадка.

КС – Координатна Сітка.

МО – Монтажний Отвір.

ПЗ – Програмне забезпечення.

SoC – System-on-a-Chip.

I²C – Inter-Integrated Circuit.

UART – Universal Asynchronous Receiver Transmitter.

USB – Universal Serial Bus.

BLE – Bluetooth Low Energy.

									Арк.
									3
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат	ДК62.468224.001				

ВСТУП

Новітня промислова індустрія не може дозволити собі зупинятись, а сучасні проблеми вимагають сучасних рішень. Метод прогнозованого обслуговування був створений для змоги визначення стану обладнання, що знаходиться на даний момент в експлуатації. Це потрібно не лише для визначення моменту, коли потрібно провести технічне обслуговування, це дозволяє зручно запланувати його і знизити вірогідність непередбачених відмов обладнання.

Ідеологія прогнозованого обслуговування - автоматизований періодичний або постійний моніторинг стану обладнання, що дозволять провести технічне обслуговування або ремонт в той момент часу, коли це буде найбільш рентабельно і обладнання не втратить ремонтпридатності. В сумі це призводить до зниження незапланованих витрат на ремонт та простій виробництва, що може нести за собою негативні наслідки у вигляді штрафів за невиконання плану.

Невід'ємним позитивним фактором такого обслуговування є те, що для оцінки стану обладнання використовують технології недеструктивного тестування (тестування, що не вимагає внесення змін в досліджуваний об'єкт): інфрачервоний або акустичний контроль, аналіз вібрації, вимірювання рівню звукового випромінювання, аналіз рідин та багато іншого.

Єдиною проблемою прогнозованого обслуговування є нерозвинений ринок обладнання для його проведення. З цього витікає багато негативних факторів: велика ціна та мала конкуренція, що несуть за собою нехтування виробниками своїх обов'язків перед замовниками та багато іншого.

									Арк.
									3
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат	ДК62.468224.001				

На даний момент на ринку представлена лише одна повноцінна система для прогнозованого обслуговування електродвигунів на основі аналізу вібрації - *3561 FC Vibration Sensors* від компанії *Fluke*. Це справді портативні модулі, що об'єднується в одну мережу та дозволяють аналізувати стан великої кількості систем на електродвигунах. Її єдиний недолік - ціна (близько 1100 \$). Незважаючи на невдалий вибір типу побудови мережі (Wi-Fi), потреби в ретрансляторах та відсутності оновлень програмного забезпечення - дана система не має конкурентів.

Метою даного проекту є розробка універсального бездротового модуля детектування та аналізу вібрації не лише електродвигунів, а й інших елементів та конструкцій, і побудови цілісної системи на сітчастій мережевій топології. Безумовними перевагами даного модуля буде його ціна, відсутність ретрансляторів, відкрита документація та універсальність.

Запропонований пристрій можна назвати універсальним – тому, що вирішується не одна задача, а цілий клас задач недеструктивного бездротового аналізу, достатньо лише змінити сенсор та внести незначні корективи в код мікроконтролера.

У роботі розглянуто створення принципової схеми, вибір елементної бази, розробка друкованого вузла, розрахунки, що підтверджують правильність конструктивних рішень та створення демонстраційної програми для мікроконтролера.

					ДК62.468224.001	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

У цьому розділі буде проведений огляд існуючих систем для прогнозованого обслуговування. Із розглянутих методів та рішень будуть обрані такі, що найкраще задовольняють вимогам, що викладені у технічному завданні.

1.1 Вибір досліджуваного фактору

Прийняття одного досліджуваного фактору визначає загальну конструкцію системи моніторингу, її характеристики та вимоги. Складність аналізу стану електродвигуна полягає в тому, що неможливо повністю оцінити його стан поза межами працюючої або тестової системи. Паралельно з цим постає інша проблема - проведення аналізу в працюючій системі накладає обмеження у виборі факторів дослідження [1]. На дослідження накладається безліч зовнішніх факторів: сторонній шум, мала кількість вільного простору, відсутність прямого доступу до об'єкту.

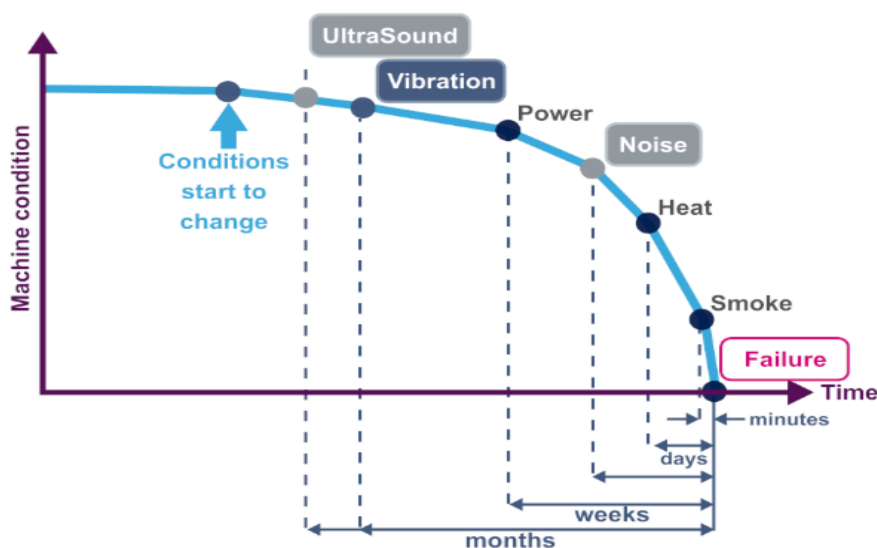


Рисунок 1.1.1 - крива зміни факторів до потенціального виходу з ладу електродвигуна

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Сам вибір фактору дослідження дає можливість оцінити стан системи, та можливість її ремонту, без його досконального аналізу, лише за його наявністю (наявністю підвищеної температури або виділення диму). Судячи з вищезазначеного - логічним буде обрання досліджуваного фактору, що дозволить визначати потенціальний вихід із ладу на максимально ранній стадії.

За даними компанії STMicroelectronics, крива зміни факторів, що впливають на відмовоспроможність, наведена на рисунку 1.1.1 [2].

Найвіддаленішими факторами, що будуть вказувати на потенціальних вихід із ладу є ультразвуковий шум (кілька місяців до потенціального виходу з ладу) та вібрація (від кількох місяців до кількох тижнів). Тим не менш, сфера прогнозованого обслуговування ще не повністю розвинена, тому брати до уваги лише на теоретичні дані - неправильно.

Опираючись на досвід компаній [3] [4], що працюють в даній сфері, було визначено: поява аномальної вібрації - це перша відправна точка для прогнозування обслуговування електродвигуна.

Пошук рішень на базі віброаналізу показав, що це достатньо вільна сфера, і бездротові системи для аналізу вібрації є дієвим інструментом для прогнозованого обслуговування [5] [6], хоч справді хороші та дешеві рішення на ринку відсутні.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

1.2 Вибір протоколу передачі інформації

Вибір бездротової технології визначає основу системи. Це пов'язано з тим, що більшість популярних протоколів передачі даних реалізуються на мікроконтролерах широкого спектру застосування, і їх завданням, зазвичай, є не лише бездротова передача інформації, а й її зчитування, обробка та взаємодія з периферійними модулями. За технічним завданням, вибір протоколу передачі має задовольняти певні критерії: сітчаста топологія мережі та можливість інтеграції із звичними для користувача пристроями (персональний комп'ютер, смартфон або планшет).

Найбільш популярними рішеннями є:

- 1) Sub 1 GHz ;
- 2) Wi-Fi ;
- 3) BLE ;
- 4) Thread ;
- 5) ZigBee ;

Технологія Sub 1 GHz [7] створена для промислового застосування, має чудові характеристики та можливість створення власних рішень передачі інформації. Єдиний недолік - потреба додаткового шлюзу для взаємодії із звичними для користувача пристроями. Персональні комп'ютери, смартфони або планшети не забезпечуються модулями, що можуть працювати з Sub 1 GHz.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

Технологія Wi-Fi [8] має чудову інтеграцію із звичними для користувача пристроями, але не є промисловим рішенням. Найбільшим недоліком є неможливість створення сітчастої топології мережі на пристроях, що побудовані на мікроконтролерах.

Технології BLE, Thread та ZigBee дуже схожі один на одного, працюють в одному частотному діапазоні і їх варто розглядати більш детально. Дослідження компанії Silabs [9] наглядно показує різницю в практичному застосуванні даних протоколів. Хоч кожний з них чудово підходить для реалізації даного технічного завдання, але лише BLE не потребує додаткових зусиль для взаємодії з різними звичними для користувача пристроями, а промислове застосування даного протоколу починає рости [10].

Вибір сітчастої топології мережі обумовлений можливістю максимальної децентралізації ключових точок: роутер, вузол, ретранслятор. Кожний із модулів є незалежним блоком, а інформацію про стан кожного з елементів мережі можна отримати підключившись до однієї з найближчих точок. Таке рішення несе за собою одну важливу перевагу – відмовостійкість, адже, з використанням такої топології, вихід із ладу одного вузла не впливає на роботу всієї мережі.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

1.3 Аналіз роботи над сенсором

Задача аналізу форми вібрацій електродвигунів вимагає використання сенсорів з максимально низьким частотним діапазоном. Оскільки за технічним завданням потрібно використовувати MEMS акселерометр - було проведено аналіз існуючих сенсорів та порівняння їх з промисловими рішеннями.

Основою проблеми є відсутність АЧХ в документаціях на сучасні акселерометри. Проблема з вимірюваннями чудово описана в досліді [11], де автори використали автокореляційну функцію та адаптивні порогові фільтри.

Це дало чудовий результат в усуненні високочастотних шумів, але, тим самим, це унеможливило аналіз дефектів підшипників, які, при наявності проблем, мають високочастотні вібрації.

Тому, для досягнення визначеної в технічному завданні мети, аналіз вібрацій електродвигунів буде проводитись на частотному діапазоні 10-1000 Гц, що повністю охоплює частоти роботи промислових двигунів. Фільтрацію даних з акселерометру, компенсацію нерівномірності АЧХ та визначення спектру буде покладено на потужності обраного мікроконтролера.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

Висновок за розділом 1

Дослідивши можливості сучасних протоколів передачі даних можна зробити висновок про доцільність використання BLE для побудови бездротової системи моніторингу вібрації для прогнозованого обслуговування. Використання MEMS акселерометра робить пристрій не лише дешевим та мобільним, а й зручним у стаціонарному застосуванні.

Розроблюваний пристрій повинен мати взяти усі позитивні сторони розглянутих пристроїв, а саме: фіксувати вібрації, передавати інформацію бездротовими технологіями, мати батарейне живлення для автономної роботи. При цьому мати відкриту документацію.

По результатам проведених патентного пошуку за даними баз Укрпатенту та аналізу сучасного стану ринку безконтактних зчитувачів можна зробити висновок про патентоспроможність розробки та існування можливості заповнення ніші ринку недорогих моделей з сучасними бездротовими мережевими можливостями.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

2. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ

2.1 Принцип роботи та функціональна схема

Для початку тезисно виділимо для себе основні вимоги до пристрою:

- Довготривале батарейне живлення
- Робота пристрою в мережі з топологією Mesh
- Отримання даних за допомогою MEMS акселерометру
- Режим глибокого сну з можливістю роботи за годинником реального часу

З цього можна виділити наступні блоки структурної схеми:

1. Блок бездротової передачі даних.
2. Блок зйому вібрації.
3. Блок живлення безпроводної частини.
4. Блок живлення ЕОМ.
5. Блок живлення MEMS акселерометру.
6. Блок додаткової Flash пам'яті для збереження бази даних.

Розглянувши необхідні елементи функціональної схеми, було розроблено структуру модуля системи, наведену на рисунку 2.1.1.

Більш детально розглянемо кожний блок структурної схеми (рис. 2.1.1), визначимо його складові частини та функції, які він має виконувати.

Сам модуль призначений для адаптивної побудови системи моніторингу вібрації і виступає у вигляді основної структурної одиниці аналізу стану парку обладнання. Зв'язок із ним має бути виконаний за Mesh топологією, побудованою за BLE протоколом, а живлення - уніфікованим, з достатньо великим можливим діапазоном напруги.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

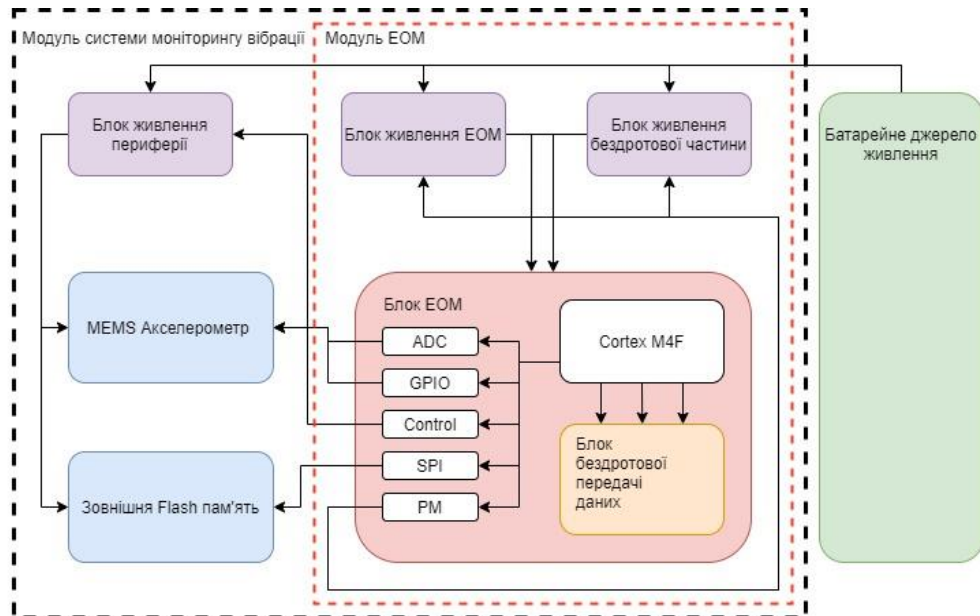


Рисунок 2.1.1. Структура схема модуля системи моніторингу вібрації

Більш детально розглянемо кожний блок структурної схеми (рис. 2.1.1), визначимо його складові частини та функції, які він має виконувати.

Сам модуль призначений для адаптивної побудови системи моніторингу вібрації і виступає у вигляді основної структурної одиниці аналізу стану парку обладнання. Зв'язок із ним має бути виконаний за Mesh топологією, побудованою за BLE протоколом, а живлення - уніфікованим, з достатньо великим можливим діапазоном напруги.

Керування схемою повністю відбувається можливостями ЕОМ, вибір якої дозволяє зменшити використання додаткових електронних компонентів.

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Сама ЕОМ повинна мати в собі ядро Cortex M4F, що, з використанням спеціалізованих операційних систем реального часу, здатно показувати неймовірні показники продуктивності.

Роздільне живлення кожного з основних функціональних блоків модуля забезпечить максимальне енергозбереження, надаючи можливість не просто переводити блоки в режим сну, а повноцінно припиняти подачу живлення. А, оскільки пристрій має працювати від батарейного джерела живлення досить тривалий термін, використання лінійних перетворювачів - недопустимо. Керування роботою кожного з блоку живлення теж покладається на можливості ядра Cortex M4F.

Використання MEMS акселерометру з аналоговою формою подачі сигналу дозволить розкрити максимальний потенціал самого напівпровідникового кристалу сенсору, надаючи інформацію без додаткових спотворень на зовнішніх АЦП (які теж вимагають калібрування, правильного термоконтролю пайки та зберігання в особливих умовах). Додатковою перевагою буде використання якісного джерела опорного живлення в мікроконтролері, що не потребує використання зовнішніх елементів.

Зовнішня Flash пам'ять необхідна для зберігання повноцінного датасету інформації, знятого модулем. Передача даних у вигляді вже сформованого пакету дозволить децентралізувати великий потік невеликих обрахувань, які можна виконати на ЕОМ модуля паралельно з перетворенням наступного пакету даних з аналогового сигналу в цифровий.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

2.2 Обґрунтування вибору елементної бази.

Створення сучасного пристрою потребує використання сучасної елементної бази, при цьому, у теперішній час бурхливого розвитку електроніки, існує надзвичайно великий вибір аналогічних за функціоналом мікросхем. Тому одразу введемо обмеження на критерії вибору:

- використання компонентів поверхневого монтажу у невеликих корпусах;
- віддається перевага мікросхемам, простим у застосуванні рішення з невеликою кількістю зовнішніх компонентів;
- при рівних інших показниках обираємо мікросхему, яку можливо придбати в Україні і яка має меншу вартість;

Вибір ЕОМ, у вигляді мікроконтролера, дуже складний. Ринок бездротових рішень не такий насичений, але вибір є. До основних компаній, що створюють такі рішення, належать: Texas Instrument, Nordic Semiconductor, Cypress Semiconductor, MicroChip та Dialog Semiconductor.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

На сьогоднішній день маємо ось такий список популярних рішень для побудови BLE пристроїв(таб 2.2.1):

Таблиця 2.1.1. Популярні мікроконтролери, та їх виробники, на даний момент.

Виробник	Чіп
Nordic	NRF52840
Dialog	DA14580
Texas	CC2540
Cypress	CY8C6347BZI

Якщо розглядати наведені вище критерії вибору елементної бази - найкращим представником виявиться чіп від Nordic Semiconductor, NRF52840. Він є одним із прекрасних представників сучасної централізації необхідної периферії та обчислювальних можливостей. Мікроконтролер має як і потужне обчислювальне ядро - Cortex M4F, що було одним із вимог ТЗ, так і набір периферії, в яку входять внутрішні DC-DC перетворювачі, необхідні для реалізації справді енергоефективного рішення. Суттєвим недоліком даного мікроконтролера є складний корпус - QFN73, що потребує побудови друкованого вузла 5 класу точності. Тому було прийнято рішення використати готовий бездротовий модуль, побудований на даному мікроконтролері. Найпопулярнішим та найбільш розповсюдженим є модуль BT840 від компанії Fanstel (рисунок 2.2.1)



Рисунок 2.2.1. Зовнішній вигляд мікроконтролерного модуля BT840.

Рішення використати модуль дає відразу багато переваг: відпадає необхідність в обв'язці мікроконтролера, наявність захисного екрану, реалізація якісної друкованої антени на модулі та можливість побудови пристрою на друкованих платах 4 класу точності.

Вибір акселерометру не менш складний етап. Вибір дуже великий, багато виробників, багато моделей у кожного з них. Після довгого аналізу всіх можливих варіантів, було прийнято рішення використати LIS344ALH, від компанії STMicroelectronics (рис 2.2.2). Робота з трьома осями, резонансна частота в 1.8 КГц (що лежить далеко за робочим діапазоном), та нерівномірність АЧХ в 3дБ в діапазоні від 0 до 1.4 КГц - ідеальний вибір за дуже малу ціну. До цього ще й додається можливість регулювання коефіцієнту чутливості між 660 та 220 мВ/(м/с²).

									Арк.
									17
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат	ДК62.468224.001 ПЗ				

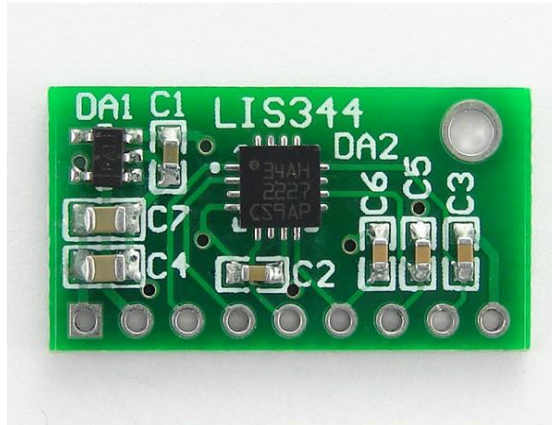


Рисунок 2.2.2. Зовнішній вигляд MEMS акселерометру LIS344ALH

Вибір зовнішньої Flash пам'яті очевидний - M24M02 від компанії STMicroelectronics(рис. 2.2.3). Це найбільш розповсюджена та проста у використанні пам'ять, що вже стала в певному розумінні культовою. Вона підтримує роботу з усіма стандартизованими режимами роботи I2C інтерфейсу, має широкий діапазон напруги живлення та впевненість в більше ніж 4 мільйонах циклів перезапису.

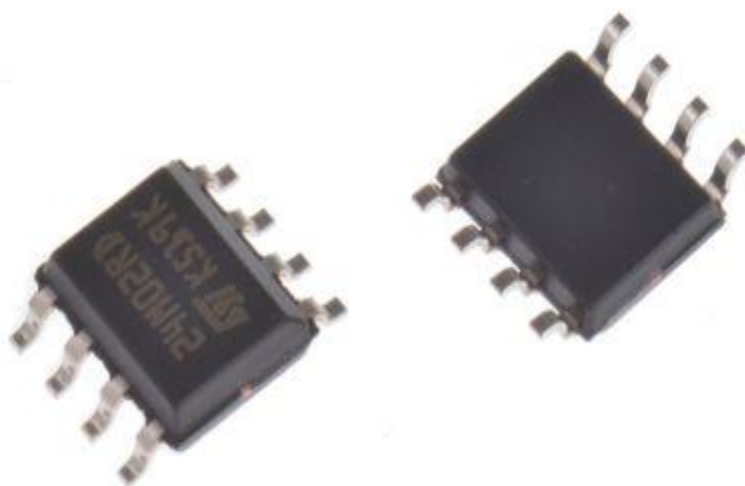


Рисунок 2.2.3. Зовнішній вигляд Flash пам'яті M24M02

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

ДК62.468224.001 ПЗ

Арк.

18

Блок живлення для акселерометру та Flash пам'яті має працювати від батарейного живлення і мати стабільну напругу на виході без залежності від вхідного діапазону. Це є суттєвою проблемою, оскільки нам необхідно отримати стандартні 3.3В від батарейного джерела, що буде з часом втрачати свою енергію, тому лінійний стабілізатор, навіть з малим падінням напруги на ньому, використовувати неможливо. Step-Up DC-DC використовувати теж недоцільно, оскільки таке рішення буде мати великі габарити та необхідність у LDO на виході.

Було прийнято рішення використати мікросхему NX4002-3.3(рис 2.2.4), що є реалізацією «зарядового насосу», і може як підвищувати, так і зменшувати напругу за необхідністю. Це чудове рішення в одному корпусі, що є компактним, недорогим та дієвим.



Рисунок 2.2.4 Зовнішній вигляд мікросхеми NX4002-3.3

Загальними компонентами для усіх блоків являються резистори і конденсатори. До них ставляться наступні вимоги: конденсатори - напруга не менше 15 В, типорозмір 0603; резистори - типорозмір 0603 та $\pm 5\%$ допуск. Обиратимемо компоненти у одного виробника з однакової серії у випадку наявності усіх потрібних

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

номиналів у продажу. Найменшу вартість та наявність усіх номіналів, як конденсаторів так і резисторів, є у виробника Yageo, зовнішній вигляд яких наведено нижче на рис. 2.2.5. Електролітичні конденсатори, в даному пристрої, не використовуються. Це обумовлено багатьма їх недоліками: наявності наскрізного струму, суттєвій часовій деградації, великими розмірами.



Рисунок 2.2.5 Зовнішній вигляд SMD компонентів.

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

ДК62.468224.001 ПЗ

Арк.

20

2.3 Розробка схеми електричної принципової.

У попередніх підрозділах була розроблена структурна схема модуля для побудови бездротової системи моніторингу вібрації і обрано сучасну елементну базу для виконання цих блоків. Зв'язок між блоками відбувається трьома методами:

- внутрішня регістрова конфігурація зовнішніх пасивних елементів (робота із внутрішніми DC-DC блоками та необхідною для них периферією);
- зв'язок з MEMS акселерометром по ADC шині;
- I2C протокол взаємодії між ЕОМ та зовнішньою Flash пам'яттю;
- керування конфігурацією акселерометра за допомогою GPIO;
- керування зовнішнім блоком живлення за допомогою GPIO.

Для спрощення розробки принципової схеми використовуватимемо переважно стандартні схеми підключення.

Модуль BT840, від компанії Fanstel, приховує в собі повноцінну реалізацію одного із стандартних включень мікроконтролера NRF52840 (рис 2.3.1). Це означає, що необхідні індуктивності, резистори та конденсатори вже розпаяні в модулі, відповідно до порад офіційних розробників Nordic Semiconductor.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

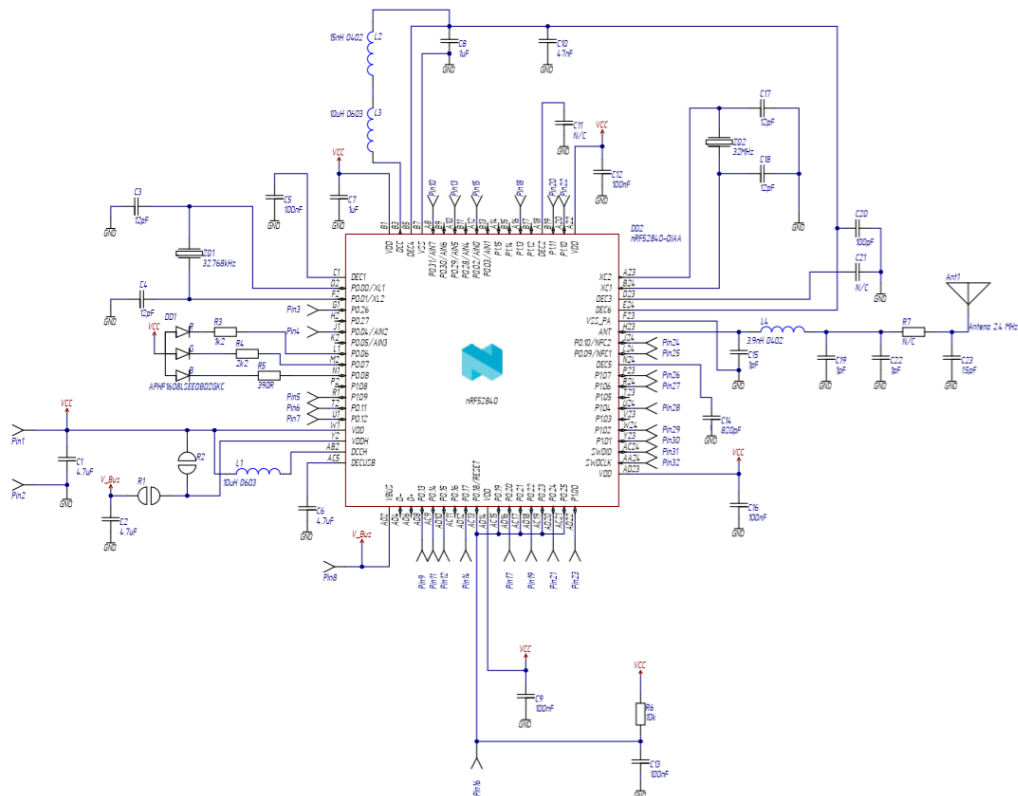


Рисунок 2.3.1. Реалізація включення NRF52840 в модулі BT840.

Особливістю даного включення є реалізація двох DC-DC перетворювачів, прихованих в SoC (рис 2.3.2). В мікроконтролері є блок Flash пам'яті, виділений для задання початкового стану периферії при ввімкненні. Даний блок є початково закритим і можливість запису в нього з'являється лише після повноцінної ініціалізації основних блоків.

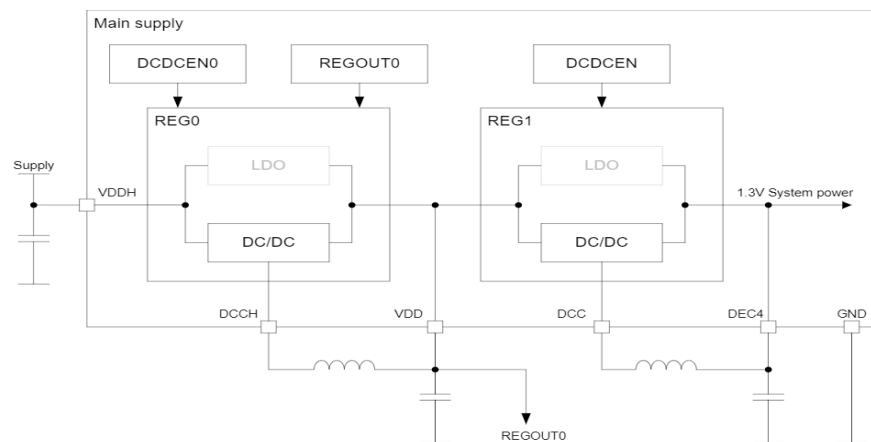


Рисунок 2.3.2. Ввімкнення DC-DC блоків в SoC NRF52840

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Отже, формування напруги для ядра Cortex M4F, та всієї внутрішньої периферії, лягає на плечі першого блоку живлення. Його, та іншого блоку, роботу забезпечує UICR блок регістрів, що є захищеними від запису до повної ініціалізації ядра. Це важливий момент, оскільки при неправильному записі, в даний блок регістрів, запуск мікроконтролеру можлива з неналаштованими DC-DC перетворювачами, що призводить до виходу SoC з ладу.

Але струм, сформований першим DC-DC блоком, недостатній для живлення зовнішньої периферії, у вигляді акселерометру та Flash пам'яті.

Для цього, ще при аналізі та формуванні функціональної схеми було прийнято рішення використання зовнішнього блоку живлення у вигляді мікросхеми “зарядового насосу” HX4002-3.3(рис 2.3.3).

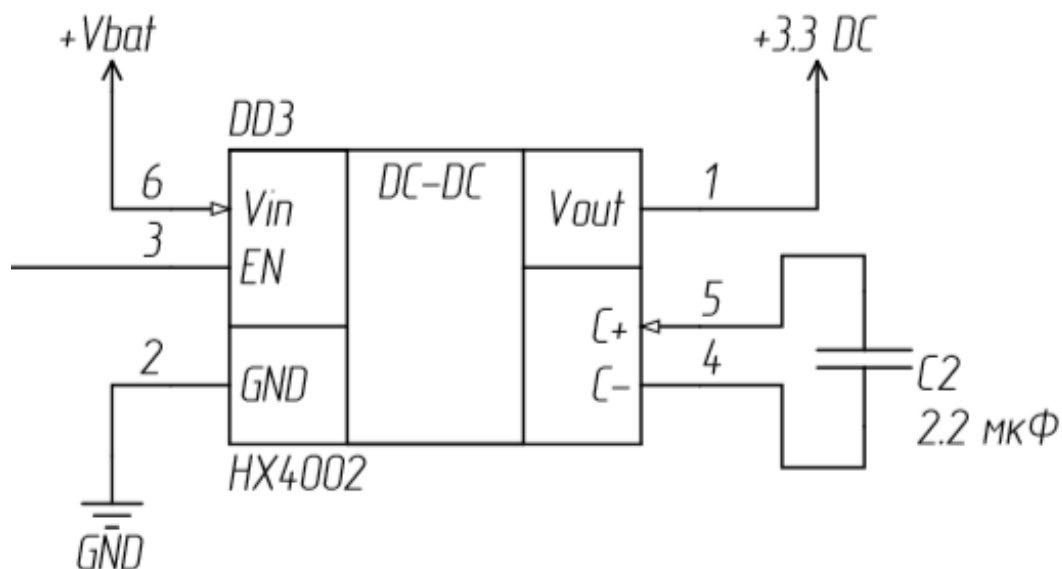


Рисунок 2.3.3 Ввімкнення HX4002-3.3

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

Даний блок отримує керуючий сигнал від модуля EOM, та, без залежності (в робочому діапазоні) від вхідної напруги Vbat, формує необхідні 3.3В для роботи акселерометру та Flash пам'яті. Керуючий сигнал на контакті EN має логічний рівень в 3.3В, який буде сформовано внутрішнім DC-DC блоком SoC лише у випадку повної ініціалізації. Тому периферія ніколи не буде споживати енергію без відома мікроконтролера.

Flash пам'ять має інтерфейс I2C та 2 контрольних сигнали . NRF52840 має мультиплексований формат вихідної периферії, тому внутрішній блок I2C можна налаштувати на будь-які GPIO контакти SoC (рис. 2.3.4). Живлення пам'ять отримує напряму від HX4002-3.3.

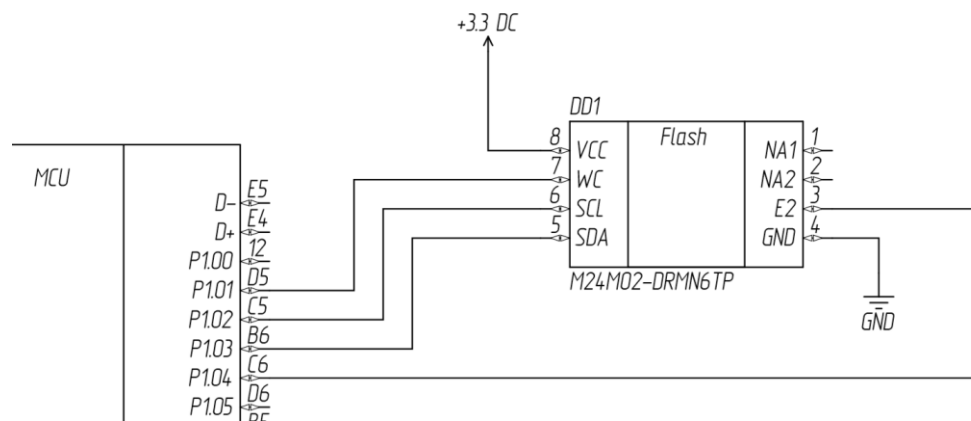


Рис 2.3.4 Схема ввімкнення flash пам'яті

Вибір акселерометру з аналоговим виходом, логічно, потребує аналогового входу на SoC. Обраний NRF52840 повністю задовільняє ці потреби, оскільки має повноцінний 14-бітний ADC, з можливістю програмного налаштування опорної напруги. Тому потреби в зовнішніх мікросхемах ADC немає. Сам акселерометр LIS344ALH, окрім живлення та сигнального виходу, має контакти для прямого керування(рис. 2.3.5): канал самотестування, канал зміни режиму

живлення та канал зміни вимірюваного діапазону (660 та 220 мВ/(м/с²)).

Необхідності в застосуванні певних частин даної мікросхеми немає, але, для гнучкості у використанні, було прийнято рішення віддати керування даними функціями мікроконтролеру.

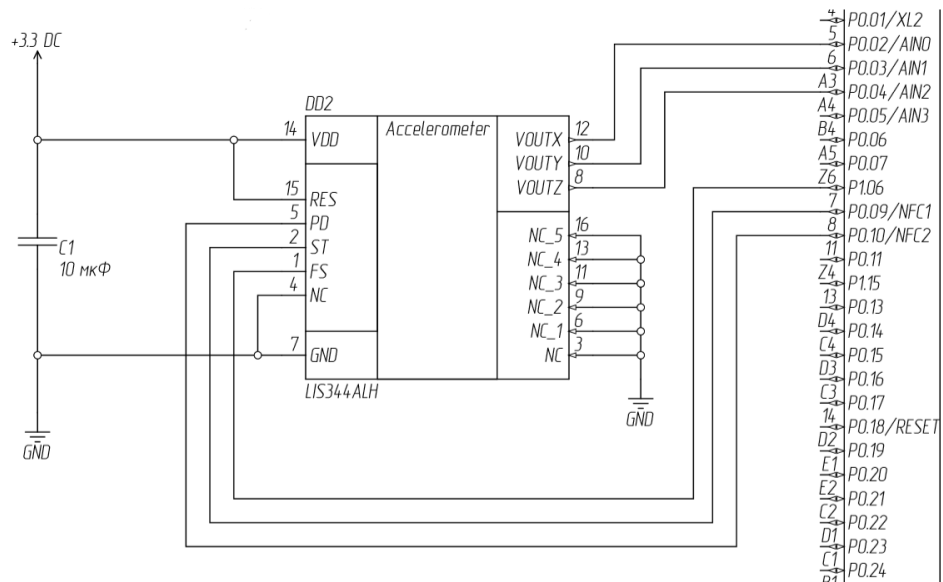


Рисунок 2.3.5 Схемотехнічне рішення ввімкнення акселерометру

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

ДК62.468224.001 ПЗ

Арк.

25

Висновки за розділом 2

Перевагами у використанні модуля BT840, від компанії Fanstel, на NRF52840 у якості обчислювального модуля стали: відсутність у необхідності створення друкованого вузла 5 класу точності, складних розрахунків антени, простий процес пайки, наявність захисного екрану. Аналоговий акселерометр, з діапазоном вихідного сигналу від 0В до 3.3В, повністю сумісний з ADC мікроконтролера, оскільки він має внутрішнє програмоване джерело опорної напруги. Використання ж зовнішньої Flash пам'яті дозволяє зберігати повний датасет зібраних даних перед відправленням їх в мережу.

В рамках даного розділу обґрунтовано вибір усіх складових елементів блоків пристрою. При цьому віддано перевагу мінімізації розмірів та вартості компонентів без погіршення характеристик пристрою. Уся використана елементна база доступна у продажі на ринку електронних компонентів.

Використовуючи отримані навички та документацію виробників електронних компонентів розроблено схему електричну принципову пристрою, яка є вихідною для його подальшого конструювання.

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНИХ РІШЕНЬ, СЕРВЕРНА ЧАСТИНА

4.1 Особливості внутрішньої структури мікроконтролера.

Створення сучасних пристроїв з використанням стандартизованих бездротових протоколів передачі інформації несе в собі одну важливу проблему: відсутність відкритих бібліотек для роботи з ними на низькому абстрактному рівні. Розглянуті в даній роботі рішення від інших компаній, при аналізі ринку та вибору елементної бази, теж мають таку проблему: відсутність відкритого коду для роботи з бездротовою частиною периферії мікроконтролера. Використаний в даній роботі мікроконтролер NRF52840 теж має цю проблему. Структура коду в його внутрішній пам'яті зображена на рисунку 4.1.1.

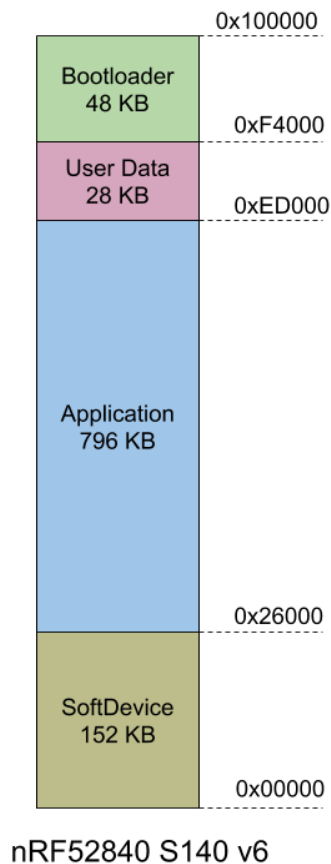


Рисунок 4.1.1. Структура коду в мікроконтролері NRF52840

Лінковка коду в даному типі мікроконтролерів дуже важлива, оскільки він має прямі залежності регістрів бездротової периферії, в які можливий запис. Без правильної лінковки це може призвести до виходу мікроконтролера з ладу. Така проблема впливає із рішення компанії Nordic Semiconductor у використанні лише одного обчислювального ядра. Cortex M4F, як видно з рисунку 4.1.2, керує не лише периферійними блоками, але й бездротовою частиною.

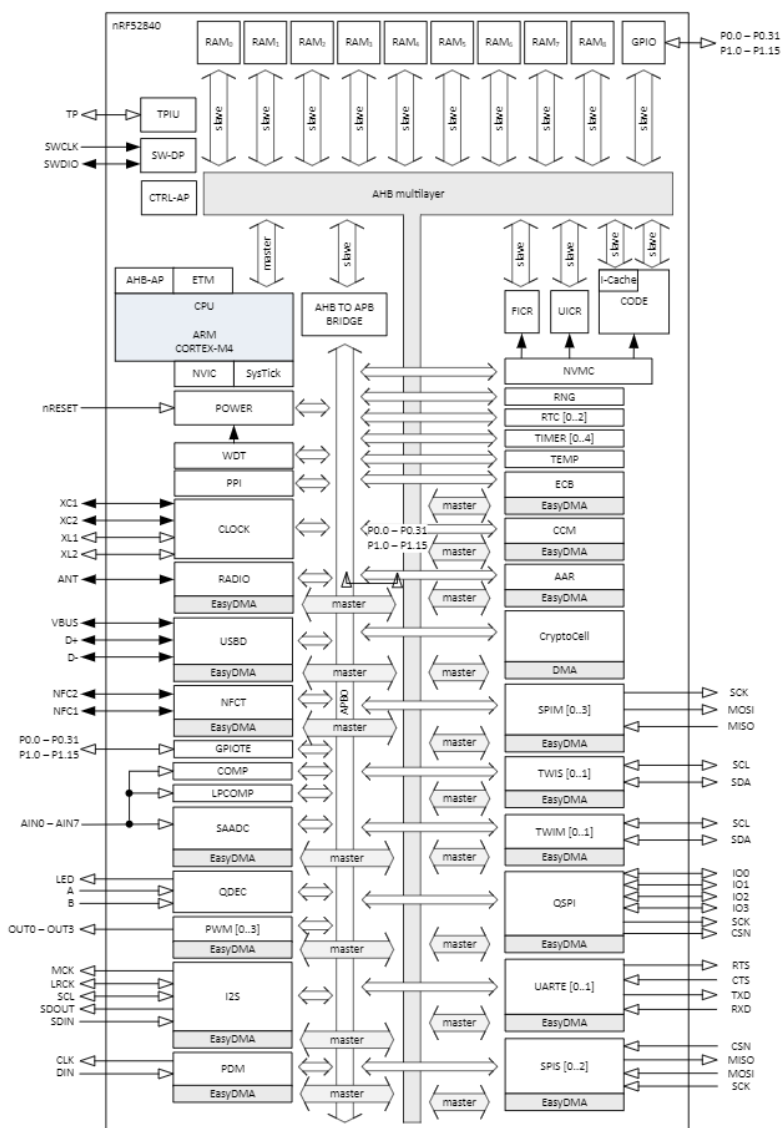


Рисунок 4.1.2. Внутрішня структура мікроконтролера NRF52840

Кінцевим висновком є унеможливлення написання низькорівневого коду для максимального задіяння всіх можливостей даного мікроконтролера та з'являється потреба у використанні певного рівня абстракції коду, який надає виробник – SoftDevice, що йде в комплекті з загальним деревом Software Development Kit.

Виробник пропонує певний набір бібліотек для роботи з блоками периферії, відкидаючи необхідність праці з регістрами мікроконтролера. Це дуже зручно, особливо у використанні з операційною системою реального часу, що є ще одним вимушеним рішенням, у зв'язку з лише одним обчислювальним ядром.

Всі ці особливості впливають на внутрішню ієрархію коду(рис 4.1.3), що буде містити в собі SDK, SoftDevice, FreeRTOS та HAL.

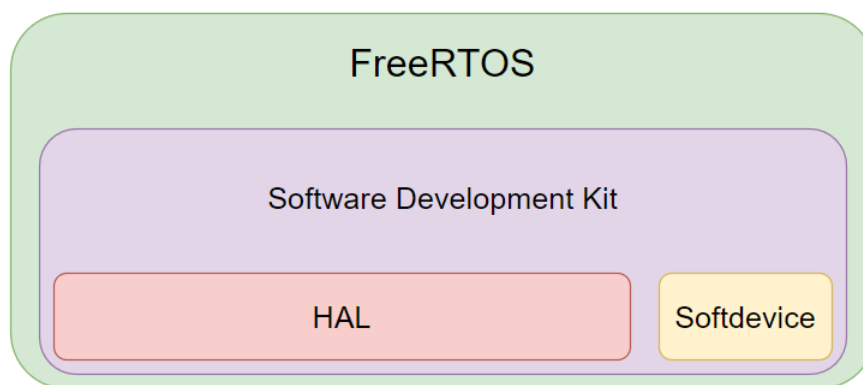


Рисунок 4.1.3. Внутрішня ієрархія програмних структур

4.2 Огляд програмних компонентів розробки.

Інтегроване середовище розробки – це набір компонентів, інструментів для розробки програмного забезпечення. Типове середовище розробки включає:

- редактор програмного коду;
- компілятор та/або інтерпретатор;
- засоби автоматизації збірки продукту;
- відладчик.

Ще однією особливістю даного мікроконтролера є можливість програмування лише засобами від компанії Segger. Для переносу коду в пам'ять використовується програматор J-Link. Для роботи з даним програматором було використано ПЗ Segger J-Flash, що необхідне для правильної лінковки коду в мікроконтролері. Компілятор, в даному випадку – GCC. Для розробки демонстраційного програмного забезпечення було обрано інтегроване середовище розробки VSCode (рис 4.2.1).

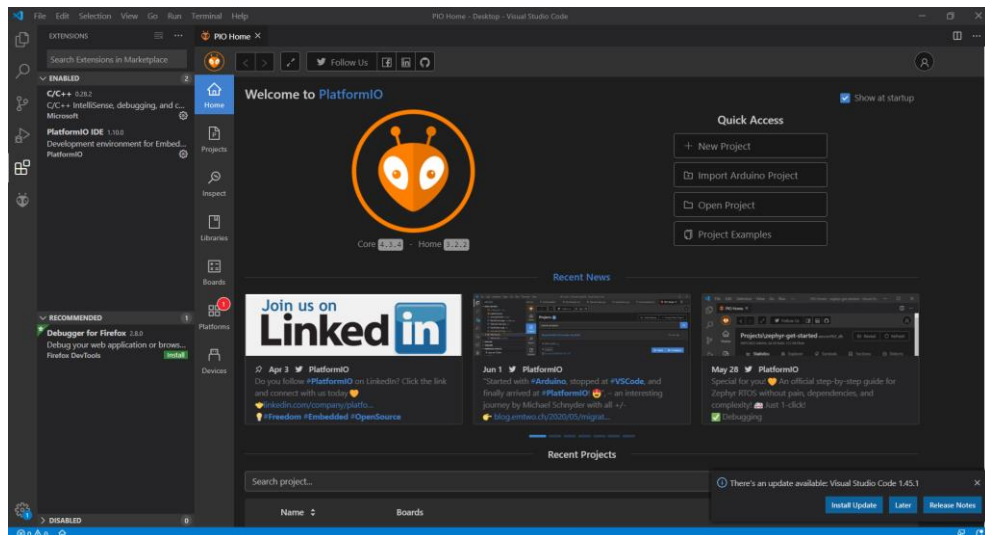


Рисунок 4.2.1. Зовнішній вигляд середовища VSCode.

VSCode є інтегрованим середовищем розробки з підтримкою системи контролю версій Git, та засобами IntelliSense. Підтримка мов програмування, засобів налагодження, додаткових інструментів профілювання здійснюється за допомогою розширень, що можуть бути встановлені з магазину додатків Microsoft.

При розробці вбудованого програмного забезпечення на базі процесорів Cortex-M використовуються наступні розширення:

- C/C++ plugin;
- CMake;
- CMake Tools;
- Cortex-Debug.

Розглянемо кожний плагін в окремоті. C/C++ – плагін, який додає підтримку мов програмування C та C++. У підтримку входять автодоповнення програмного коду, засоби налагодження, інструментарій IntelliSense. CMake – додає підтримку CMake language, що використовується для крос-платформної компіляції проекту. CMake Tools – додатковий інструментарій CMake, що дозволяє конфігурувати проект, завантажувати прошивку до пристрою, запускати компіляцію проекту. Cortex-Debug – плагін для підтримки налагодження процесорів з архітектурою Cortex. Конфігурація плагіну здійснюється за допомогою JSON-файлів. Як основну мову програмування для реалізації проекту було обрано останній доступний стандарт мови програмування C++, а саме C++17.

4.3. Інструменти для розробки демонстраційного програмного забезпечення.

Для перевірки працездатності побудованої схеми було використано NRF52 DK (рис 4.3.1), що являє собою платформу для розробки, яка містить в собі мікроконтролер NRF5240, програматор J-Link OB, всю необхідну обв'язку для використання мікроконтролера у всіх можливих його режимах включення та кілька світлодіодів з кнопками в якості простої периферії.

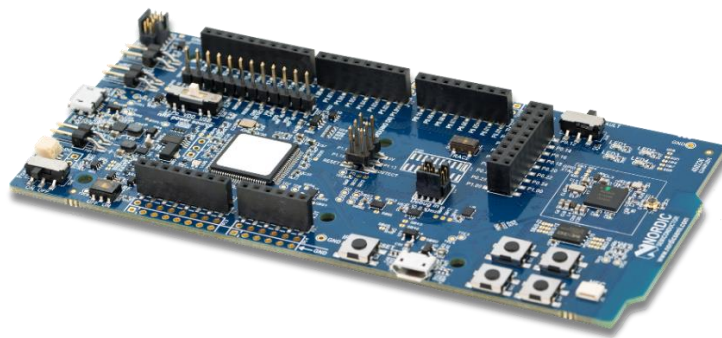


Рисунок 4.3.1. Зовнішній вигляд платформи NRF52 DK

Для перевірки бездротової частини було написано код, наведений в Додатку Г, інформація з якого, для тестування, приймалась на BLE монітор від компанії Nordic Semiconductor (рис 4.3.2).

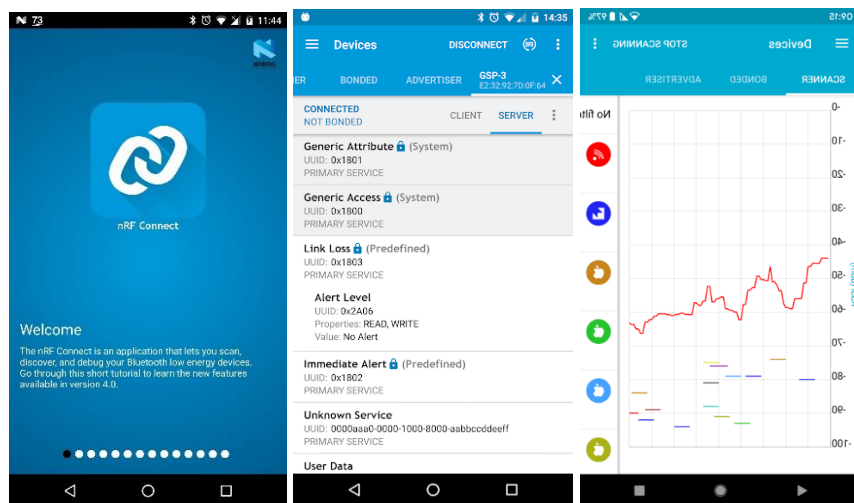


Рисунок 4.3.2. BLE монітор від Nordic Semiconductor

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

4.4. Розробка алгоритму дії демонстраційного програмного забезпечення.

Основою роботи даного пристрою є реєстрація та аналіз вібрацій, знятих за допомогою аналогового акселерометру. Для цього, звісно потрібно аналізувати сигнал, знятий за допомогою АЦП.

Для початку нам потрібно усунути можливий вплив земної сили тяжіння на пристрій, оскільки MEMS акселерометри мають негативну властивість до статичних показників позиціонування в просторі (рис 4.4.1). Для цього достатньо при ввімкненні пристрою (під час його монтування) провести автоматичне калібрування, а початкові значення сигналу прийняти за позиційні, основні.

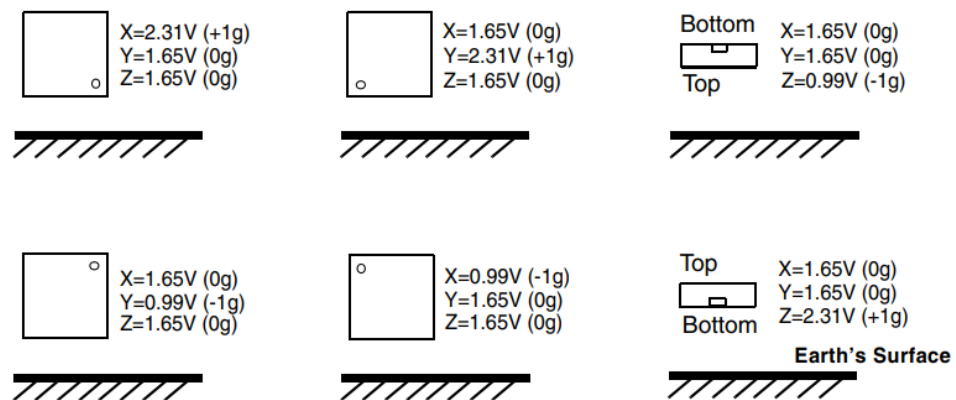


Рисунок 4.4.1. Вихідні статичні показники в залежності від позиціонування акселерометру в просторі

Також слід зауважити, що MEMS акселерометри мають певну нерівномірність АЧХ. Для їх усунення пропонується застосувати такий алгоритм:

1. Виміряти буфер даних, достатній для побудови спектру.
2. Виконати швидке перетворення Фур'є, виміряного буферу та знайти сплески на ньому.

3. Відкинути значення з частотами за межами вимірюваного спектру $10\text{Гц} < F < 1000\text{Гц}$ (в частотній області)
4. Визначити середньо-квадратичне значення кількох вимірів.

Сукупність даних кроків необхідна для усунення відхилення показників кожного окремого акселерометру, адже кожний окремо взятий представник буде мати свої власні відхилення, і лише після повноцінної калібровки всі пристрої будуть мати однакові показники. Для виміру віброприскорення потрібно застосувати формулу 4.1, в якій ми застосовуємо коригуючий множник лінії спектру Q_i :

$$\Lambda = \sqrt{\sum_i (a_i q_i)^2}, \quad (4.1)$$

Даний множник можна отримати лише після проведення експериментальних дослідів на повіреному вібростенді з лінійним вибором частоти вібрації. Для цього потрібно провести спектральний дослід з еталонним сенсором, після чого порівняти дані на всьому вимірюваному діапазоні у вигляді (4.2):

$$Q_i = \frac{\Lambda_{\text{Розроблений}}}{\Lambda_{\text{Еталонний}}}, \quad (4.2)$$

За відсутності даних показників було прийнято рішення в симуляції вхідних даних програмними методами, для демонстрації працездатності даного рішення. В зв'язку з цим фільтрація даних аналогового акселерометру не розглядається.

Структура програмного забезпечення, в даному випадку, має лінійний вигляд: заповнення буферу для вимірів, обчислення за швидким перетворення Фур'є з статичним вибором границь діапазону виміру, передача отриманих результатів.

Генерація семплів сигналу на платі налагодження.

Для реалізації генерації семплів вхідного сигналу потрібно визначити: частоту генерації вхідного сигналу, розмір вхідної вибірки та розмір вихідної вибірки(в два рази менший за розмір вхідної). За це відповідають відповідно константи, задані через макроси:

```
#define FFT_TEST_SAMPLE_FREQ_HZ 2000.0f
#define FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN 128
#define FFT_TEST_OUT_SAMPLES_LEN (FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN / 2)
```

Для генерації семплів та їх подальшої обробки повинно визначити відповідні масиви. Масив вхідних значень представляє собою семпли у часовій області. Після виконання FFT буде отримано вихідну вибірку в частотній області. Масиви відповідно означені як `static float32_t`:

```
m_fft_input_f32[FFT_TEST_COMP_SAMPLES_LEN];
static float32_t m_fft_output_f32[FFT_TEST_OUT_SAMPLES_LEN];
```

Генерація вхідних семплів виконується у функції:

```
static void fft_generate_samples(float32_t * p_input, uint16_t size, float32_t
sampling_freq, float32_t sine_freq, bool add_noise)
```

параметрами якої є: показчик на масив, у який будуть записані згенеровані семпли, розмір вхідного масиву, частота дискретизації, максимальна частота синусоїдальної хвилі та

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

булевий параметр, що відповідає за додавання шуму до сигналу(амплітуда шуму задається макросом NOISE_AMPLITUDE).

Реалізація функції представляє собою генерацію двох компонент вхідного масиву, а саме дійсної та уявної частини комплексного числа. Дійсна частина представляє собою генероване значення однієї точки синусоїдальної хвилі, уявна частина дорівнює нулю

```
p_input[(uint16_t)i] = sin(sine_freq * (2.f * PI) * sample_idx / sampling_freq);
```

Реалізація функції `fft_process` представляє собою виклик відповідної функції з бібліотеки CMSIS-DSP з відповідним дескриптором перетворення, вхідним масивом даних, вихідним масивом даних та розміром вихідного буфера. У випадку використання буфера на 128 семплів (64 комплексних пари) дескриптором ШПФ буде структура `arm_cfft_sR_f32_len64`, для вибірки у 256 семплів- відповідно `arm_cfft_sR_f32_len128`. Ця структура є елементом узгодження між розмірами вхідного та вихідного буферів. Функція, що виконує ШПФ - `arm_cfft_f32`, яка аргументами приймає дескриптор вхідного буферу `p_input_struct`, вхідний масив даних, вихідний масив даних, флаг, що вказує на виконання прямого або зворотного ШПФ та флаг виконання реверсу бітів. Після виконання ШПФ над вхідним буфером виконується визначення величини для кожного отриманого біну за допомогою функції `arm_cmplx_mag_f32` який є результатом ШПФ. Аргументи функції - покажчик на вхідний буфер, покажчик на вихідний буфер, розмір вихідного буфера.

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат

```

static void fft_process(float32_t *p_input, const arm_cfft_instance_f32 * p_input_struct,
float32_t *p_output, uint16_t output_size)

{

    arm_cfft_f32(p_input_struct, p_input, m_ifft_flag, m_do_bit_reverse);

    arm_cmplx_mag_f32(p_input, p_output, output_size);

}

```

Головна функція програми містить у собі наступні виклики: встановлення режиму генерації шуму до вхідного сигналу, виклик генерації семплів вхідного сигналу, обробку вхідного буферу ШПФ, малювання заголовку для виводу у термінал та виводу даних, отриманих у результаті виконання ШПФ.

Функція виводу заголовку виводить частоту генерованого масиву семплів та наявність шуму у генерованому сигналі. Для малювання графіку у терміналі функція виконує пошук найбільшого значення у вихідному буфері за допомогою `arm_max_f32`, після чого виконує порядковий вивід отриманих результатів, виводячи у термінал | або символ пробілу в залежності від поточного значення, що обробляється.

В залежності від режиму роботи FPU (режим опитувань або режим переривань)виконується встановлення пріоритету переривання FPU у NVIC, очищення відповідного флагу та ввімкнення відповідного переривання. Також, у випадку роботи з перериваннями FPU слід зазначити необхідність очистки регістру FPSCR та очистку очікуваних переривань FPU.

Це необхідна частина коду, коли програма використовує режим економії енергії та після обробки помилок FPU в режимі опитування.

Вивід у термінал виконується за допомогою сімейства функцій `NRF_LOG_XXXXX` які дозволяють гнучко конфігурувати рівень логування даних, виконувати базове форматування, виконувати очистку потоку виводу, виконувати кольоровий вивід(для терміналів та низькорівневих реалізацій логеру, що підтримують цю можливість). У даному випадку є необхідним використовувати наступні функції, `NRF_LOG_DEFAULT_BACKENDS_INIT` для ініціалізації логеру, `NRF_LOG_RAW_INFO` для виводу неформатованих рядків (задача форматування у цьому випадку покладається на користувача), та `NRF_LOG_FLUSH`, що є макросом для обробки всіх записів з буфера. Виклик `NRF_LOG_FLUSH` є блокуючим, поки всі буферизовані записи не будуть оброблені драйвером виводу.

Слід зазначити, що у вихідному масиві формується вибірка амплітуд сигналу, адже у функції, що виконує ШПФ модифікація вихідного масиву виконується лише під час обчислення `magnitude` у нього. Розмір вхідного буферу- 128 семплів, розмір вихідного буферу – поділений навпіл розмір вхідного. На отриманому у консолі результаті спостерігається явище, що називається "відзеркалення спектру" [14], природою якого є неоднозначність представлення сигналу як суми гармонік для відтворення початкової функції сигналу (рисунок 4.4.2). Це є особливістю алгоритму ШПФ.

					<i>ДК01.468213.001 ПЗ</i>	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

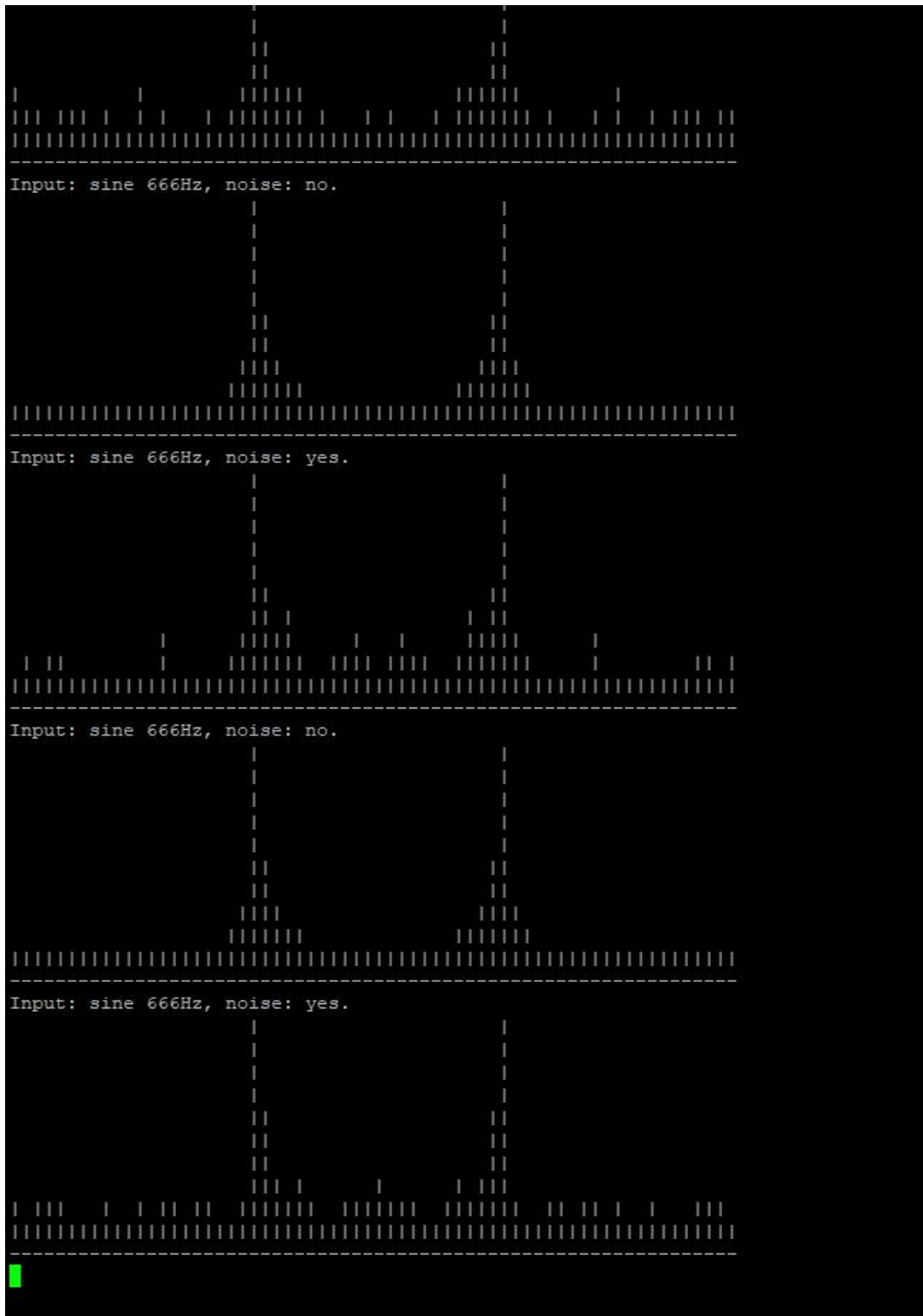


Рисунок 4.4.2. Отриманий результат в моніторі послідовного порту при моделюванні вхідного сигналу в 666 Гц.

Висновки за розділом 4

Сучасні мікроконтролери вже зовсім не схожі на своїх попередників. Вони дозволяють запускати на собі не лише складні програми, а повноцінні операційні системи реального часу, з реалізацією справді складних та часово-залежних задач. Новітні SoC дають неабиякий простір для створення різноманітних комплексних пристроїв з мережевими можливостями, що були доступні лише для старший видів протоколів: Wi-Fi, Sub 1Ghz та інші.

Використання інтегрованих середовищ для розробки коду дуже спрощують програмування та відладку, що є досить складними процесами.

Робота з цим розділом допомогла не лише створити програмне забезпечення та перевірити працездатність схемотехнічних рішень, але й дала мені можливість вивчити сучасні програмні рішення для побудови бездротових пристроїв загального вжитку.

					ДК01.468213.001 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		

ВИСНОВКИ

Після проведеного аналізу сучасних пристроїв для детектування, аналізу та передачі зареєстрованих вібрацій, для подальшого їх аналізу в прогнозованому обслуговуванні електродвигунів, було створено нове бачення на реалізацію такого пристрою.

Для цього було розглянута повноцінна структура сучасного SoC NRF52840, апаратні та бездротові інтерфейси. А для цього було проаналізовано та обрано протокол для побудови сітчастої мережі та побудови повноцінної структури на ній. Використаний в даній роботі модуль дає можливість організувати таку мережу за BLE протоколом та, одночасно, працювати із периферійними пристроями, такими як акселерометр, Flash пам'ять та інші.

Розроблено структурну схему пристрою, що ~~вмістив в собі~~ блок обчислення та комунікації на основі зазначеного вище модуля від компанії Fanstel, блок реєстрації та зчитування вібрації, блок запису даних та кілька блоків живлення кожного окремого з вищезазначених блоків.

Обґрунтовано вибір необхідної для схемотехнічного проектування елементної бази. Перевагу отримати компоненти, що не лише були прості у застосуванні, але й ті, що спрощують вихідну схемотехніку, допомагаючи цим спростити виготовлення вихідного друкованого вузла. Зокрема: бездротовий модуль BT840, акселерометр LIS344ALH, зовнішня мікросхема пам'яті M24M02 та мікросхема блоку живлення на основі зарядового насосу NX4002-3.3.

У середовищі САПР Altium Designer було виконано проектування принципової електричної схеми та виконано розробку топології друкованої плати 4 класу точності, що за подальшими розрахунками, показала свою працездатність. Конструкторсько-

					ДК62.468224.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат		60

технологічні та електричні розрахунки підтвердили правильність попередніх припущень при створенні друкованого вузла. Розрахунок надійності встановив, що час напрацювання на відмову складає 45400 годин, а ймовірність відмови у перший рік експлуатації – 19%. Розрахунки на вихід з ладу після довготривалої експлуатації не розглядались.

Було розглянуто, вивчено та застосовано сучасне інтегроване середовище VSCode у якості платформи для написання, компілювання та відладки коду для NRF52840. Сучасні програмні рішення показали свою спроможність в створенні справді складних та багатопотокових рішень на мікроконтролерах з одним обчислювальним ядром. На базі платформи для розробника NRF52 DK було перевірено створене програмне рішення.

					<i>ДК62.468224.001 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>		61

Заява-анкета для оформлення екзаменаційного листка

Прошу зареєструвати мене для участі у вступному(их) випробуванні(ях) для вступу для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за спеціальністю: 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Для реєстрації надаю таку інформацію

Персональні дані:

прізвище Кияниця

ім'я Артем по батькові Сергійович

дата народження 1 вересня 1998 року;

документ, що посвідчує особу паспорт ТТ 243473;

тип документа

серія (за наявності), номер

реєстраційний номер облікової картки платника податків 3603810957.

Дані про освіту: здобуду освітній ступінь бакалавра в поточному році в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

(назва закладу вищої освіти)

дані довідки, що підтверджує факт замовлення диплома бакалавра _____; (вказують особи, які завершують навчання в поточному році, персональні дані яких не вносяться до Єдиної державної бази з питань освіти)

здобув ступінь вищої освіти бакалавра/магістра (освітньо-кваліфікаційний рівень спеціаліста) в _____ році;

дані документа про здобутий ступінь вищої освіти _____.

(вказують особи, які завершили навчання в минулих роках)

серія

номер

Дані, необхідні для формування екзаменаційного листка:

номер(и) контактної(их) телефону(ів) 0958919192 _____;

назва іноземної мови, із якої бажаю скласти єдиний вступний іспит Англійська _____;

населений пункт, у якому бажаю скласти єдиний вступний іспит Київ _____;

назва блоків, із яких бажаю скласти єдине фахове вступне випробування _____;

населений пункт, у якому бажаю скласти єдине фахове вступне випробування Київ _____;

інформація про необхідність створення особливих умов Не потребую _____; (вказати потребу/не потребу)

код(и) умов(и) _____; _____; _____; _____;

дата та номер медичного висновку _____.

Зазначені мною дані правильні


підпис

А.С.Кияниця
ініціали, прізвище

Електронна адреса для листування artemkyianytsia@gmail.com.

Прошу надіслати оформлений екзаменаційний листок засобами поштового зв'язку (ознайомлений, що оплата за доставку здійснюється за рахунок отримувача):

Нова Пошта: Населений пункт Київ Номер відділення 116

Укрпошта: індекс _____ Населений пункт _____

вулиця/будинок _____

До заяви-анкети додаю:

копію документа, що посвідчує особу;





фотокартку для документів;

копію облікової картки платника податків;

копію довідки, виданої за місцем навчання, щодо планового завершення навчання та отримання диплома в рік вступу (для осіб, які завершують навчання в поточному році, персональні дані яких не вносяться до Єдиної державної бази з питань освіти)/ копію документа про здобутий ступінь вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) (для осіб, які завершили навчання в минулих роках);

копію медичного висновку за формою первинної облікової документації 086-3/о (у разі необхідності створення особливих умов для проходження вступного випробування).

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл-ть	Прим.
				<u>Документація</u>		
A3			ДК62.468223.001 ЕЗ	Бездротова система моніторингу вібрації Принципова схема	1	
A3			ДК62.750706.001 СК	Плата Складальне креслення	1	
A4			ДК62.468223.001 ПЗЗ	Бездротова система моніторингу вібрації для прогнозованого обслуговування Перелік елементів	1	
				<u>Деталі</u>		
A3	1		ДК62.758724.001	Друкована плата	1	
				<u>Інші вироби</u>		
				<u>Конденсатори</u>		
		2		CC0603KRX7R7BB104 0,1мкФ, 16В, ±10%, X7R, Yageo	2	С3, С5
		3		CC0603ZRY5V6BB225 2,2мкФ, 10В, ±10%, Y5V, Yageo	1	С2
		4		CC0603KRX5R5BB106 10мкФ, 6,3В, ±10%, X5R, Yageo	1	С1
		5		F930J107KAAAJ6 100мкФ, 6,3В, ±10%, X7R, AVG	2	С2, С4
				<u>Мікросхеми</u>		
		6		LIS344ALH, STM	1	DD1
		7		M24M02-DRMN6TP, STM	1	DD2
		8		HX4002-3.3, HEXIN	1	DD3

					ДК62.750706.001 СП			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Гордієнко Я.О.			Плата. Специфікація	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Кияниця А.С.				0	1	2
Реценз.						НТУУ «КПІ», ФЕЛ, КЕОА, гр. ДК-62		
Н. Контр.		Лисенко О. І.						
Затвердив		Короткий Є.В.						

DK62.468223.00133

Перв. застосує.

Спроб. №

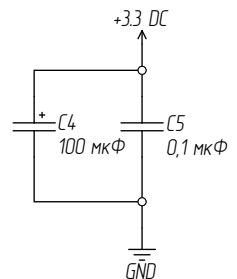
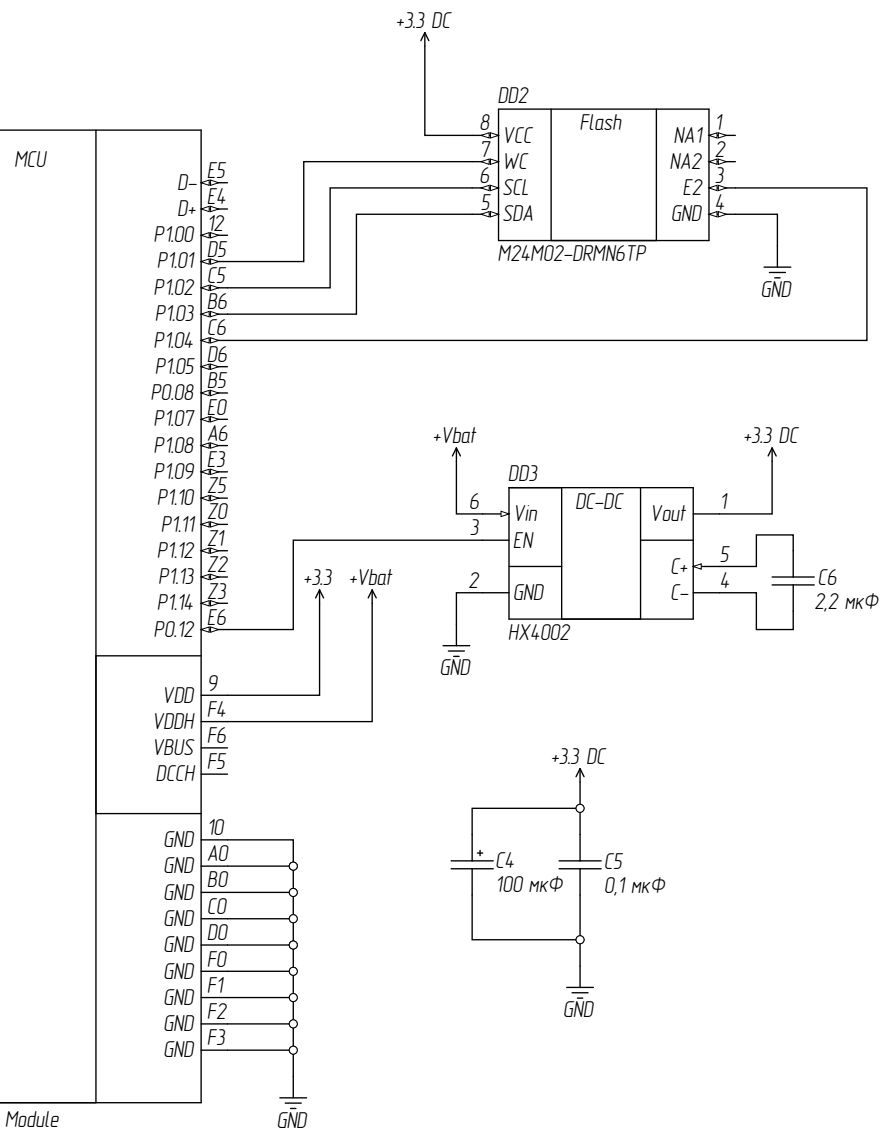
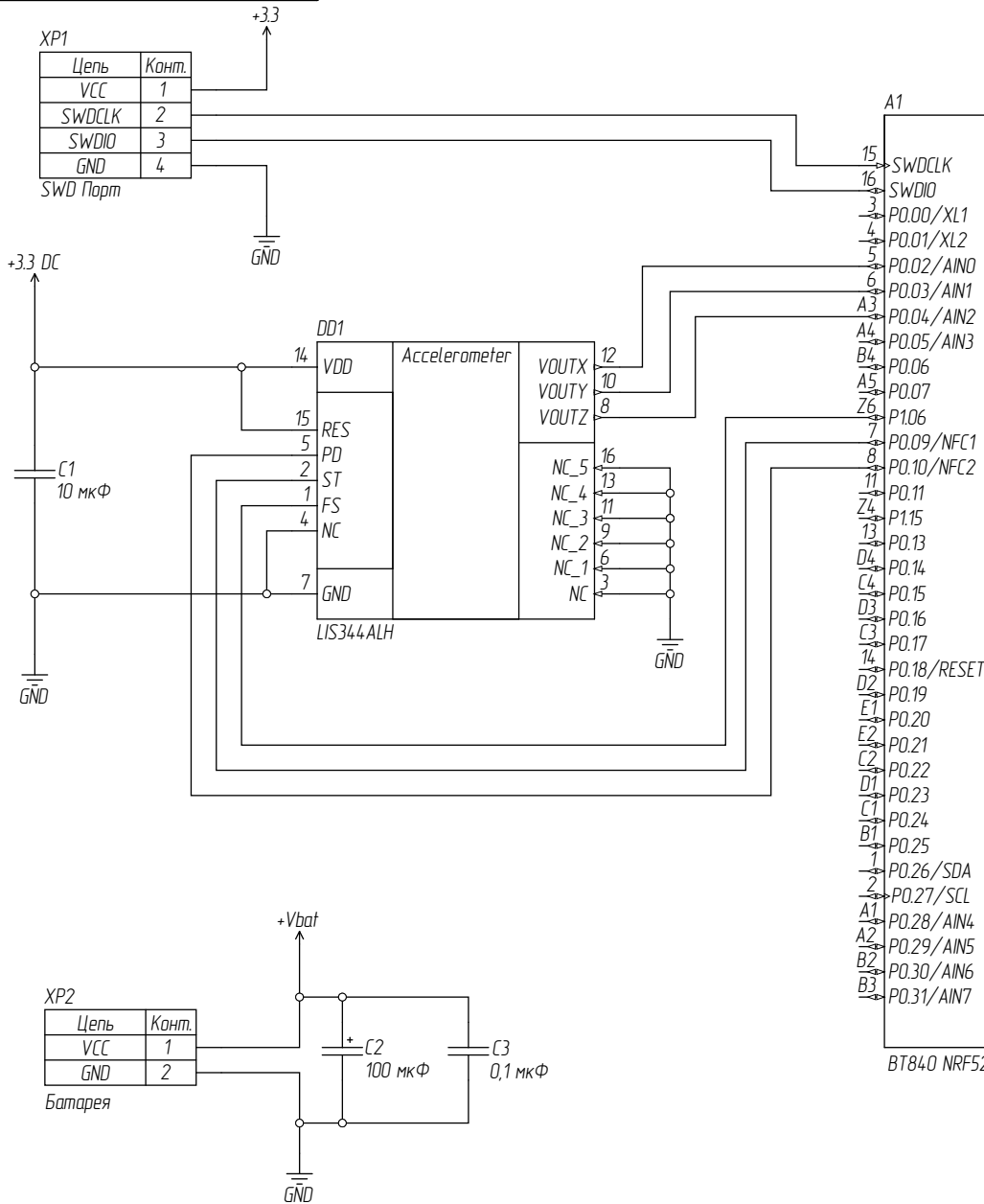
Підп. дата

Інв. № дудл.

Взам. інв. №

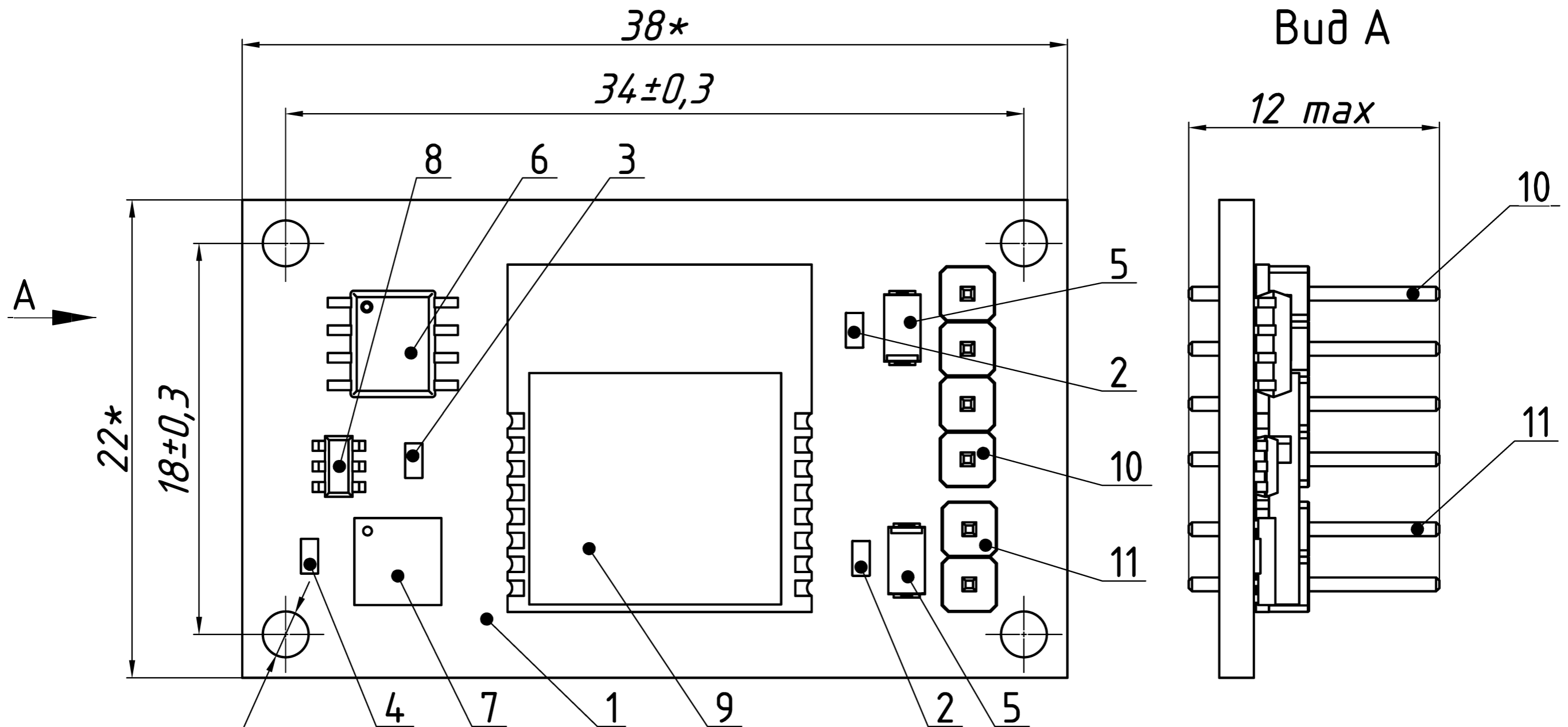
Підп. та дата

Інв. № подл.



BT840 NRF52840 Module

DK62.468223.00133						
Бездротова система моніторингу вібрації				Лім.	Маса	Маштаб
Взм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	0	1:1
Розроб.	Гордієнко Я.О.		<i>[Signature]</i>			
Перев.	Кияниця А.С.		<i>[Signature]</i>			
Схема електрична принципова				Арк. *	Аркуші *	
Н.контр.	Лисенко О.І.		<i>[Signature]</i>		КПІ ім.І.Сікорського	
Затв.	Короткий Є.В.		<i>[Signature]</i>		ФЕЛ, КЕОА, ДК-62	



4 отв. $\phi 2,1 \pm 0,1$

*Розміри для довідок

1. Усі виводи елементів паяти припоєм ПОС 61 ГОСТ 21930-76 (поз. 13)
2. Крок координатної сітки 0,1 мм
3. Елементи встановлювати згідно ГОСТ 29137-91:
 - 3.1. Поз. 2-5 встановлювати за варіантом 070.4.0505

3.1. Поз. 6-8 встановлювати за варіантом 360.18.1113

3.2. Поз. 10, 11 встановлювати за варіантом 220.03.0403

4. Елемент поз. 9 встановлювати згідно ГОСТ ІЕС 61188-5-8-2013 ч.5-8

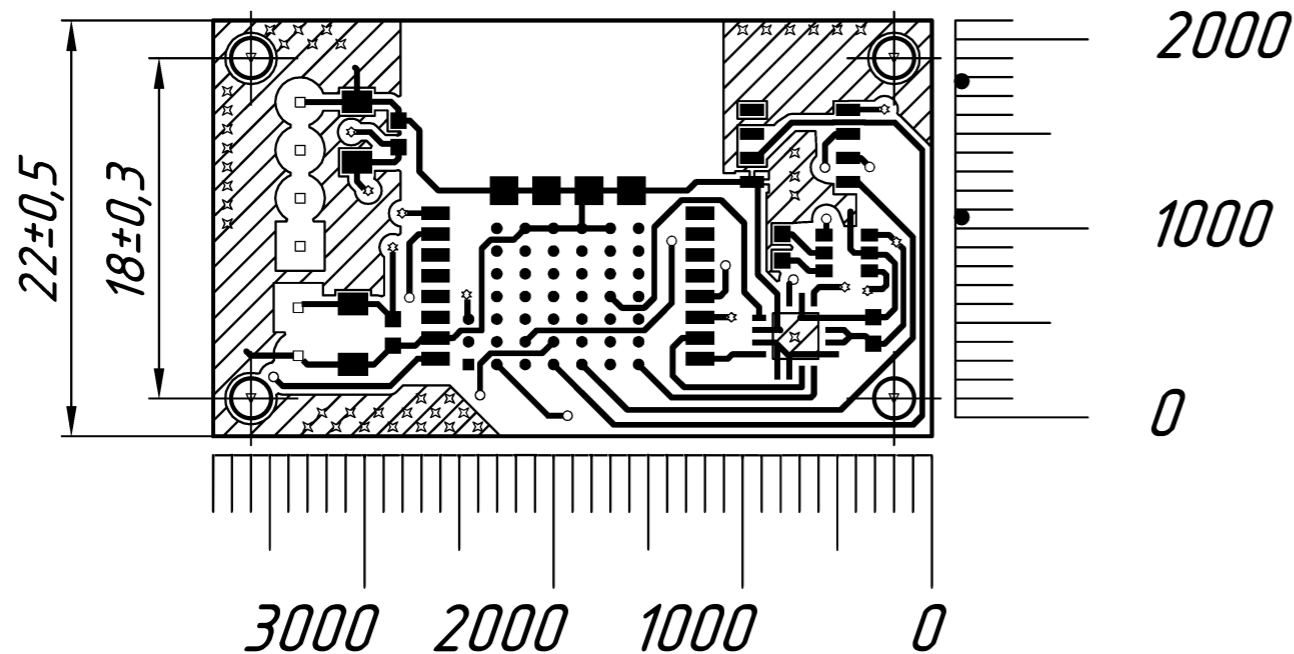
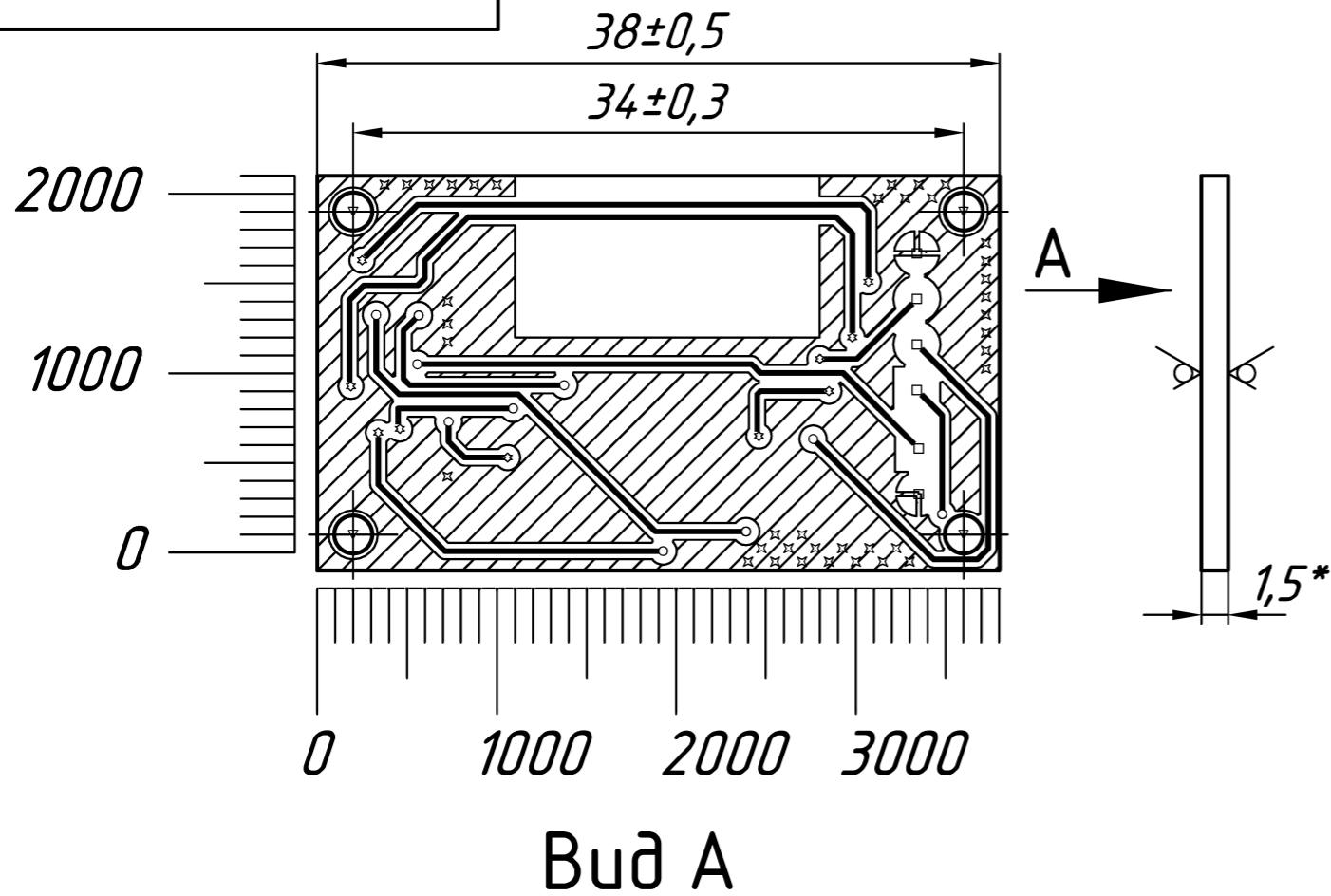
5. Плату покрити лаком УР-231 ТУ-6-21-14-90 (поз. 12) в два шари

6. Елементи поз. 10 і 11 захистити від покриття лаком

					ДК62.750706.001 СК			
Зм	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	Плата. Складальне креслення	Лім.	Маса	Масштаб
Розроб.	Гордієнко Я. О.					0	50г	5:1
Перев.	Кияниця А. С.					Аркуш 1	Аркушів 1	
Т.контр.	Лисенко О. І.					"КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕЛ, ДК-62		
Н.контр.	Лисенко О. І.							
Затв.	Короткий Е. В.							

DK62.758723.001

$\sqrt{Ra10}$



Таблиця 1.

Умовна позначка контакт. майданчика	Кількість КМ	Розміри КМ, мм
■	8	(1,27x0,64)±0,05
■	8	(0,85x0,85)±0,05
■	6	(0,65x0,9)±0,05
■	16	(1,5x0,7)±0,05
■	4	(1,5x1,5)±0,05
-	16	(0,71x0,3)±0,05
■	1	(0,6x0,6)±0,05
■	4	(1,6x1,2)±0,05
●	60	φ0.6±0,05

Таблиця 2.

Умовна позначка отвору	Кількість отворів	Діаметр отвору, мм	Наявність металізації в отворі
▽	4	2,1±0,1	Є
☆	10	0,4±0,1	Є
□	6	1,1±0,1	Є
☆	39	0,3±0,1	Є
○	10	0,5±0,1	Є

* Розміри для довідок

1. Плата повинна відповідати ГОСТ 23752-79. III група жорсткості
2. Клас точності 4 по ГОСТ 23751-86
3. Крок координатної сітки 0,01 мм. Лінії координатної сітки нанесені через кожні 100 кроків
4. Плату виготовити комбінованим позитивним методом по ОСТ5-9707-88

5. Конфігурацію провідників витримати за координатною сіткою.

Мінімальна ширина провідників 0,3 мм

6. Покрити сплавом Розе чистий ТУ 6-09-4065

7. Параметри контактних майданчиків наведені у таблиці 1

8. Параметри отворів наведені у таблиці 2

					DK62.758723.001			
Зм	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	Плата друкована	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.		Гордієнко Я. О.				0		15г
Перев.		Кияниця А. С.						
Т.контр.		Лисенко О. І.				Аркуш 1		Аркушів 1
Н.контр.		Лисенко О. І.			Склотекстоліт FR4-2-35-1,5 ГОСТ 10316-78	"КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕЛ, ДК-62		
Затв.		Короткий Е. В.						