

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

*бакалавр*

(назва освітнього ступеня)

на тему: *Комп'ютерна система модифікації голосу в реальному часі*

Виконав: студент 4 курсу, групи СІ-42  
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

*Петрик М.А.*

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

*Тих С. В.*

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

*Луцик Н.С.*

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

*Осухівська Г.М.*

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

*Суприк Г.Б.*

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2026

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Осухівська Г.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
«25» квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(шифр і назва спеціальності)

студента Петрика Максима Андрійовича  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна система модифікації голосу в реальному часі

Керівник роботи Тиш Євгенія Володимирівна, к.т.н., доцент кафедри КС  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » квітня 2026 року № 4/9-188

2. Термін подання студентом завершеної роботи 17 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технічного завдання

2. Проектна частина

3. Практична частина

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Структурна схема комп'ютерної системи.

2. Блок-схема алгоритму функціонування системи.

3. Схема електрична принципова.

4. Схема електрична функціональна.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>			

7. Дата видачі завдання 25.04.2026 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розробка технічного завдання</i>	<i>26.01 – 02.02</i>	
2.	<i>Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»</i>	<i>03.02 – 15.02</i>	
3.	<i>Робота над другим розділом «Проектна частина»</i>	<i>20.04 – 28.04</i>	
4.	<i>Робота над третім розділом «Практична частина»</i>	<i>30.04 – 10.05</i>	
5.	<i>Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»</i>	<i>12.05 – 18.05</i>	
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>20.05 – 7.06</i>	
7.	<i>Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами</i>	<i>8.06 – 14.06</i>	
8.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>15.06 – 21.06</i>	
9.	<i>Захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>24.06</i>	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

*Петрик М.А.*

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

*Тили Є.В.*

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Петрик М.А. Комп'ютерна система модифікації голосу в реальному часі: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 — комп'ютерна інженерія. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026.

Ключові слова: цифрова обробка сигналів, модифікація голосу, мікроконтролер, Pitch Shifting, шина I2S, DMA, реальний час.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці комп'ютерної системи модифікації голосу в режимі жорсткого реального часу на базі мікроконтролера STM32F4, цифрового MEMS-мікрофона та зовнішнього аудіокодека. Система забезпечує безперервну обробку аудіосигналу та гнучко регулює тональність голосу за допомогою математичного алгоритму Pitch Shifting на основі швидкого перетворення Фур'є. Для мінімізації затримок та уникнення акустичних артефактів передача звукових масивів між периферією організована через контролери прямого доступу до пам'яті (DMA) з використанням подвійної буферизації. Усі обчислювальні операції максимально оптимізовані за допомогою апаратного співпроцесора FPU та бібліотеки CMSIS-DSP. Розроблена комп'ютерна система здатна автономно та стабільно забезпечувати високоякісну спектральну модифікацію звуку без перевантаження процесорного ядра.

## ANNOTATION

Petryk M.A. Computer System for Real-Time Voice Modification: Bachelor's Graduation Thesis: speciality 123 — computer engineering. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2026

Keywords: digital signal processing, voice modification, microcontroller, pitch shifting, I2S bus, DMA, real-time.

The bachelor's thesis is devoted to the development of a hard real-time computer voice modification system based on the STM32F4 microcontroller, a digital MEMS microphone, and an external audio codec. The system ensures continuous audio signal processing and flexibly adjusts voice tonality using a mathematical pitch-shifting algorithm based on the Fast Fourier Transform (FFT). To minimize latency and prevent acoustic artifacts, the transfer of audio arrays between peripherals is organized via Direct Memory Access (DMA) controllers utilizing double buffering. All computational operations are highly optimized utilizing the hardware Floating-Point Unit (FPU) coprocessor and the CMSIS-DSP library. The developed computer system is capable of autonomously and stably providing high-quality spectral sound modification without overloading the processor core.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ .....	10
1.1 Огляд існуючих систем та методів цифрової обробки звуку .....	10
1.2 Аналіз вимог до комп'ютерної системи модифікації голосу .....	13
1.3 Аналіз можливих апаратних та програмних рішень поставленого завдання.....	16
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА.....	20
2.1 Розробка узагальненої структури комп'ютерної системи .....	20
2.2 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення.....	23
2.3 Обґрунтування вибору програмного забезпечення.....	26
2.3.1 Вибір середовища розробки та бібліотек цифрової обробки сигналів (DSP).....	26
2.4 Проектування апаратної частини комп'ютерного засобу .....	28
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	32
3.1 Реалізація програмної частини системи .....	32
3.1.1 Налаштування прямого доступу до пам'яті (DMA) та інтерфейсу I2S ....	33
3.1.2 Розробка алгоритму зміни спектральних характеристик (Pitch Shifting)	35
3.2 Тестування розробленої комп'ютерної системи. ....	36
РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ..	41
4.1 Загальні вимоги безпеки з охорони праці для користувачів ПК .....	41

					КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Комп'ютерна система модифікації голосу в реальному часі					
Розроб.		Петрик М.А.						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Тиш Є.В.						Н	6	
Реценз.		Суприк Г.Б.						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42		
Н. Контр.		Луцик Н.С.								
Затверд.		Осухівська Г.М.								

4.2	Техніка безпеки при проведенні електричних вимірювань та випробувань установки.....	42
	ВИСНОВКИ.....	45
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	46
	Додаток А Технічне завдання	
	Додаток Б Перелік елементів	
	Додаток В Лістинг програмного коду комп'ютерної системи модифікації голосу	
	Додаток Г Схема електрична принципова	

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ВСТУП

Сучасні інформаційні технології широко використовуються для обробки аудіосигналів у режимі реального часу . Одним із напрямків розвитку таких технологій є створення систем модифікації голосу, які дозволяють змінювати спектральні та часові характеристики мовного сигналу без помітного погіршення його якості [21]. Подібні системи застосовуються у засобах голосового зв'язку, мультимедійних комплексах, інтерактивних розважальних системах, а також у спеціалізованих засобах анонімізації мовлення.

У більшості сучасних рішень обробка аудіоданих виконується із використанням персональних комп'ютерів або віддалених серверів. Такий підхід забезпечує значні обчислювальні можливості, проте супроводжується підвищеними вимогами до енергоспоживання, збільшенням затримок обробки та необхідністю передачі голосових даних через мережу. Передавання аудіоінформації зовнішнім сервісам створює додаткові ризики щодо конфіденційності даних та несанкціонованого доступу до них.

Одним із перспективних напрямків є реалізація алгоритмів цифрової обробки сигналів безпосередньо на вбудованих мікроконтролерних платформах. Використання сучасних мікроконтролерів сімейства STM32 на базі архітектури ARM Cortex-M4 із модулем апаратної підтримки операцій з плаваючою комою дозволяє виконувати складні математичні обчислення у режимі реального часу при відносно низькому енергоспоживанні [17]. Наявність спеціалізованих DSP-інструкцій забезпечує ефективне виконання алгоритмів обробки аудіосигналів, а підтримка цифрових аудіоінтерфейсів дає можливість організувати безперервний обмін даними між пристроями введення та виведення звуку.

Для забезпечення мінімальної затримки під час передавання аудіоданих доцільним є використання механізму прямого доступу до пам'яті DMA, який дозволяє здійснювати передачу даних між периферійними модулями та оперативною пам'яттю без постійного залучення центрального процесора.

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поєднання інтерфейсу I2S для роботи з цифровими аудіопристроями та технології DMA створює умови для побудови високопродуктивної системи цифрової обробки звуку з гарантованими часовими характеристиками.

Особливий інтерес становлять алгоритми зміни висоти тону голосу (Pitch Shifting), які дозволяють модифікувати мовний сигнал без зміни тривалості відтворення. Реалізація таких алгоритмів на ресурсно-обмежених мікроконтролерних платформах потребує оптимізації обчислювальних процедур та ефективного використання апаратних можливостей мікроконтролера.

У зв'язку з цим актуальною є розробка комп'ютерної системи модифікації голосу в реальному часі на базі мікроконтролера STM32 із використанням цифрового мікрофона, аудіокодека, інтерфейсу I2S, механізму DMA та алгоритмів цифрової обробки сигналів. Метою роботи є розробка програмно-апаратної системи модифікації голосу в реальному часі, здатної забезпечувати зміну характеристик мовного сигналу з мінімальною затримкою обробки та високою якістю вихідного звуку.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

## 1.1 Огляд існуючих систем та методів цифрової обробки звуку

Цифрова обробка звуку є одним із базових напрямків сучасних комп'ютерних технологій. Вона широко використовується в системах зв'язку, мультимедійних комплексах, аудіопроекторах, засобах розпізнавання мовлення та пристроях модифікації голосу. Основою будь-якої такої системи є процес перетворення аналогового аудіосигналу в цифрову форму. Це завдання вирішується шляхом дискретизації та квантування (рис. 1.1) [32].

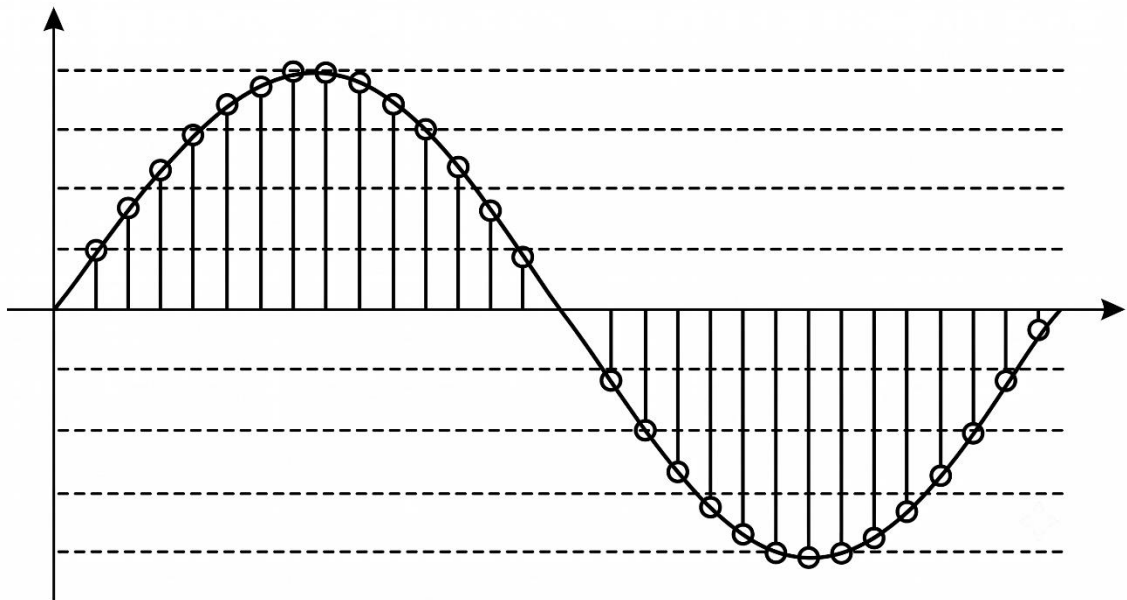


Рисунок 1.1 – Процес аналого-цифрового перетворення (дискретизація та квантування)

Якість відтворення звукової інформації безпосередньо залежить від обраної частоти дискретизації та розрядності даних. Для чистої передачі

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Петрик М.А.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Тиш Є.В.			Н	10	
Реценз.		Суприк Г.Б.			ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42		
Н. Контр.		Луцик Н.С.					
Затверд.		Осухівська Г.М.					
					Аналіз технічного завдання		

мовного сигналу оптимально використовувати частоти від 8 до 48 кГц при розрядності 16 або 24 біти на відлік. Підвищення цих параметрів покращує точність сигналу, але пропорційно збільшує навантаження на обчислювальну систему та вимагає більшого обсягу оперативної пам'яті. Ключовим фактором для систем модифікації голосу є забезпечення обробки даних у режимі реального часу, де наскрізна затримка є мінімальною і непомітною для користувача.

Для реалізації алгоритмів цифрової обробки звуку існують два основні підходи: програмний та апаратний. Програмний підхід передбачає виконання математичних обчислень на персональних комп'ютерах або серверах за допомогою цифрових аудіостанцій та VST-плагінів. Головною перевагою таких рішень є висока гнучкість налаштувань та підтримка складних алгоритмів. Проте використання операційних систем загального призначення неминуче створює проблему непередбачуваної системної затримки. Диспетчери завдань, фонові процеси та драйвери пристроїв спричиняють коливання часу обробки аудіоблоків. Навіть спеціалізовані аудіодрайвери не здатні повністю усунути вплив операційної системи. Тому програмні рішення ідеально підходять для студійної обробки, але є непридатними для портативних пристроїв анонімізації голосу.

Апаратний підхід базується на використанні спеціалізованих цифрових сигнальних процесорів, програмованих логічних інтегральних схем та високопродуктивних мікроконтролерів [34]. Раніше для складних алгоритмів застосовувалися переважно DSP-процесори та FPGA-матриці, які гарантували детермінований час виконання операцій. Однак вони відрізняються високою вартістю та складністю розробки. Розвиток технологій зумовив появу мікроконтролерів сімейства ARM Cortex-M4. Вони поєднують високу обчислювальну потужність із низьким енергоспоживанням. Наявність апаратного модуля FPU дозволяє миттєво виконувати операції з числами з плаваючою комою, а DSP-інструкції прискорюють розрахунок цифрових

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						11
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

фільтрів. Важливою перевагою є також підтримка механізму прямого доступу до пам'яті DMA, який розвантажує центральне ядро під час маршрутизації аудіопотоків.

Основною задачею розроблюваної системи є зміна висоти тону голосу без впливу на швидкість його відтворення. Цей функціонал реалізується за допомогою алгоритмів Pitch Shifting, які поділяються на методи часової та частотної областей. До методів часової області належать алгоритми OLA та PSOLA (рис. 1.2).

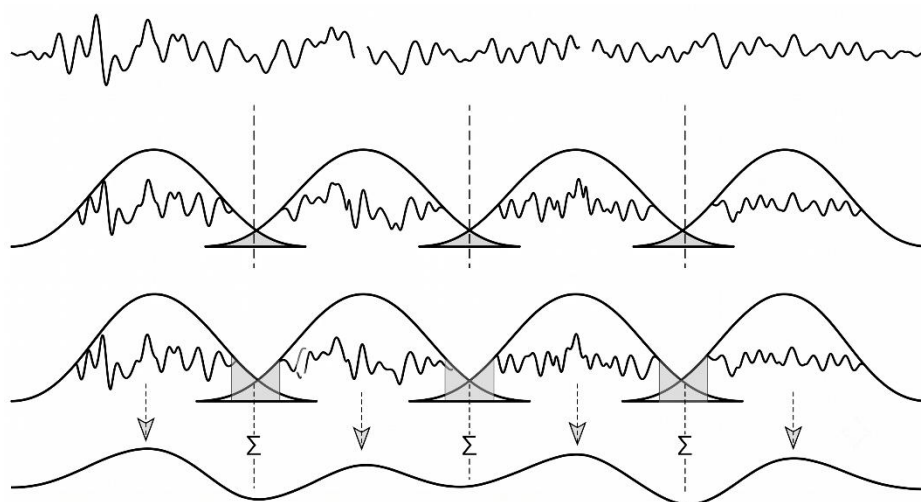


Рисунок 1.2 - Принцип роботи алгоритму зсуву тональності Overlap-Add (OLA)

Їхній принцип роботи базується на розбитті вхідного сигналу на окремі фрагменти з подальшим їх зсувом та перекриттям. Ці методи вимагають небагато оперативної пам'яті, тому легко реалізуються на ресурсно-обмежених мікроконтролерах. Водночас чистота вихідного звуку сильно залежить від точності алгоритмів сегментації сигналу.

Методи частотної області працюють на основі швидкого перетворення Фур'є та фазового вокодера. Вони виконують спектральний аналіз сигналу, масштабують необхідні частотні компоненти та відновлюють часову форму звукової хвилі. Такі алгоритми забезпечують найвищу якість зміни

тональності та зберігають природність голосу. Однак їхня реалізація вимагає великої обчислювальної потужності та значних обсягів оперативної пам'яті для зберігання масивів спектральних даних. Для мікроконтролерів із обмеженим обсягом SRAM це є суттєвим викликом при роботі в реальному часі.

Підсумовуючи, аналіз існуючих систем показує, що найбільш доцільним рішенням для розробки портативного пристрою модифікації голосу є апаратна платформа на базі мікроконтролера STM32. Наявність DSP-інструкцій та периферії DMA дозволяє обійти обмеження програмних рішень. Вибір конкретного алгоритму Pitch Shifting повинен здійснюватися з жорстким урахуванням доступних апаратних ресурсів та вимог до часу системної затримки.

## 1.2 Аналіз вимог до комп'ютерної системи модифікації голосу

Розробка комп'ютерної системи модифікації голосу в реальному часі вимагає чіткого формування вимог до апаратного та програмного забезпечення. Якість роботи такого пристрою залежить не лише від математичної точності алгоритмів, а й від швидкості їх виконання. Головною особливістю систем жорсткого реального часу є те, що всі обчислення мають виконуватися в межах суворо визначених часових інтервалів.

Найважливішим параметром для проектованої системи є наскрізна затримка сигналу, яку також називають латентністю. Це час між потраплянням звуку в мікрофон та його відтворенням із динаміка. Психоакустичні дослідження доводять, що коли ця затримка перевищує 20–30 мілісекунд, людина починає чути власний голос із відчутним запізненням. Це викликає сильний дискомфорт і збиває з пантелику під час розмови через ефект затримки слухового зворотного зв'язку. Тому сумарний час, який витрачається на оцифрування, буферизацію, математичну обробку та виведення звуку,

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						13
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

повинен гарантовано складати менше 20 мс, як це показано на схемі наскрізної затримки (рис. 1.3).

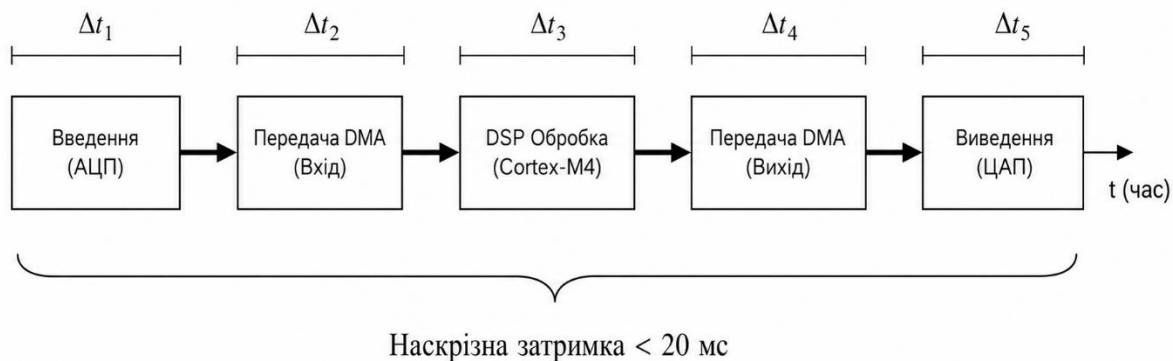


Рисунок 1.3 – Структура наскрізної затримки аудіосигналу в системі реального часу

Наступна група вимог стосується параметрів самого звуку. Основна енергія людського мовлення зосереджена в діапазоні частот від 300 до 3400 Гц. Згідно з теоремою Котельникова-Шеннона, щоб оцифрувати звук без спотворень та ефекту аліасингу, частота дискретизації має щонайменше вдвічі перевищувати максимальну частоту корисного сигналу [19]. З огляду на це, для нашого пристрою оптимально обрати частоту 16 кГц або 32 кГц, що дає необхідний запас якості для чіткого розпізнавання голосу. Розрядність даних доцільно встановити на рівні 16 біт. Це класичний стандарт, який забезпечує чисте звучання без надмірного перевантаження оперативної пам'яті мікроконтролера.

Щодо апаратної платформи, то алгоритми зміни висоти тону вимагають виконання тисяч математичних операцій за мілісекунду, включаючи множення, додавання та роботу з тригонометрією. Тому критичною вимогою є наявність у мікроконтролері апаратного модуля обробки чисел з плаваючою



Суть подвійної буферизації полягає в тому, що поки апаратний контролер DMA заповнює звуком першу половину пам'яті, процесор паралельно обробляє другу половину. Коли перша частина заповниться, вони миттєво міняються місцями. Це надійний спосіб уникнути пропусків та заїкання звуку. Через необхідність мікросекундної точності виконання коду використання операційних систем типу Linux або Windows є неприпустимим, адже їхні планувальники задач та фонові процеси неминуче перервуть обробку звуку. Програмування має здійснюватися за підходом Bare-metal без операційної системи або за допомогою бібліотек апаратної абстракції HAL, що дозволяє повністю контролювати часові характеристики.

Окрема вимога стосується взаємодії з користувачем та стабільності роботи. Система повинна мати фізичні органи керування, наприклад тактові кнопки, для зміни тональності голосу безпосередньо під час роботи. Програмна логіка має обробляти ці натискання так, щоб перемикання режимів алгоритму відбувалося плавно. Воно не повинно викликати цифрових клацань, розривів аудіопотоку чи апаратних збоїв основного циклу обробки.

Отже, розроблювана комп'ютерна система модифікації голосу є вузькоспеціалізованим комплексом, який вимагає ідеального інженерного балансу. Вона повинна поєднувати високошвидкісну апаратну базу з наявністю модулів FPU, DMA та I2S з максимально оптимізованим програмним кодом, що працює автономно, забезпечуючи комфортне спілкування користувача в режимі жорсткого реального часу.

### 1.3 Аналіз можливих апаратних та програмних рішень поставленого завдання

Реалізація комп'ютерної системи модифікації голосу в реальному часі потребує ретельного вибору апаратної та програмної платформи. Вона повинна забезпечувати необхідну обчислювальну потужність при жорсткому

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						16
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

дотриманні вимог щодо мінімальної затримки та стабільності роботи. Вибір архітектури безпосередньо впливає на успішність реалізації математичних алгоритмів, тому варто проаналізувати існуючі на ринку технічні рішення.

Розпочнемо з 8-бітних мікроконтролерів сімейства AVR. Вони широко застосовуються в навчальних проєктах, приваблюють простотою розробки та низькою вартістю. Проте їхні можливості є абсолютно недостатніми для обробки аудіосигналів на льоту. Обмежена тактова частота, відсутність апаратного обчислювача з плаваючою комою FPU та малий обсяг оперативної пам'яті роблять виконання складної математики неможливим. Крім того, слабка підтримка механізмів прямого доступу до пам'яті негативно впливає на швидкість передачі звуку.

Інший полюс - використання потужних одноплатних комп'ютерів на кшталт Raspberry Pi. Вони дозволяють запускати повноцінну операційну систему Linux та використовувати готові студійні аудіоплагіни. Проте для вузькоспеціалізованого портативного пристрою це рішення є нерациональним. Більшість апаратних ресурсів простоюватиме, а операційна система загального призначення створюватиме непередбачувані затримки через роботу планувальника задач та системних служб. Унаслідок цього дотримання жорстких часових вимог реального часу стає неможливим.

Окремої уваги заслуговують мікроконтролери сімейства ESP32. Вони мають високу продуктивність, але їхньою головною перевагою є вбудовані бездротові інтерфейси Wi-Fi та Bluetooth. Для задачі модифікації голосу ці мережеві можливості є зайвими, а їхня фоновіа робота може створювати додаткове навантаження на процесор, порушуючи стабільність аудіотракту.

Аналіз показує, що найбільш збалансованим рішенням є 32-бітні мікроконтролери сімейства STM32F4 на базі ядра ARM Cortex-M4. Вони ідеально поєднують високу продуктивність із низьким енергоспоживанням. Апаратний модуль FPU та підтримка спеціалізованих DSP-інструкцій дозволяють миттєво виконувати складні операції множення та фільтрації

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сигналів. Розвинена багатоканальна система DMA забезпечує незалежну від ядра передачу звуку, що формує ідеальну апаратну базу для нашого проєкту (рис. 1.5).

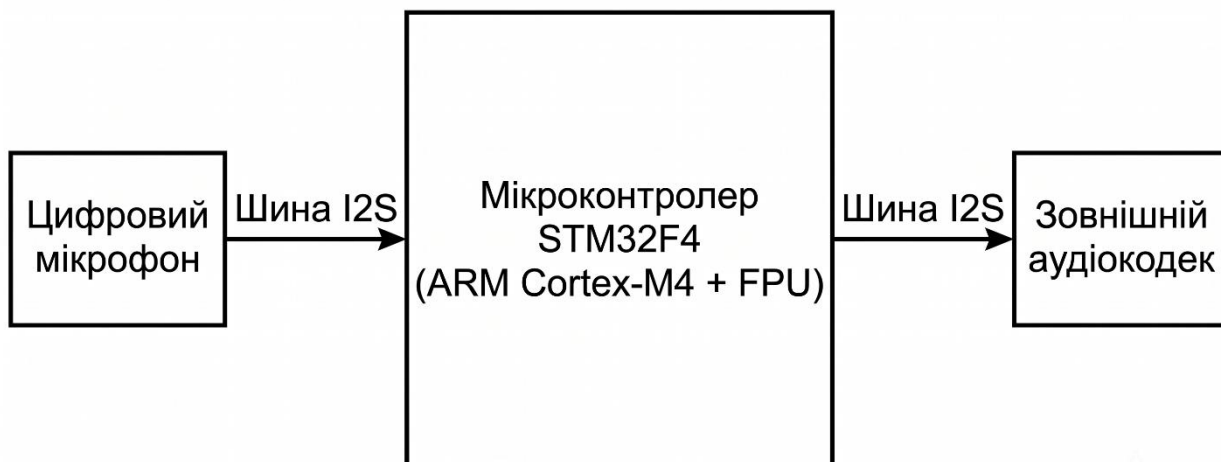


Рисунок 1.5 – Структурна схема обраної апаратної платформи

Обираючи засоби введення та виведення звуку, перевагу також слід надати цифровим рішенням. Аналогові мікрофони та вбудовані цифрово-аналогові перетворювачі мікроконтролера сильно вразливі до електромагнітних наведень і шумів друкованої плати. Натомість цифровий мікрофон і зовнішній аудіокодек повністю захищені від цих проблем. Передача даних між ними та мікроконтролером здійснюється через цифрову шину I2S, що гарантує високу перешкодостійкість та апаратну синхронізацію аудіопотоку.

Останнім етапом є вибір програмної архітектури. Класичні операційні системи реального часу RTOS забезпечують зручну багатозадачність, але вимагають додаткових витрат пам'яті та процесорного часу на перемикання контексту. Оскільки для нашої системи критичною є абсолютна детермінованість обчислень, найкращим вибором є підхід Bare-metal. Програма працює без операційної системи, напряду взаємодіючи з обладнанням через переривання та бібліотеки апаратної абстракції HAL. Для

реалізації алгоритмів оптимально використати спеціалізовану бібліотеку CMSIS-DSP, яка містить максимально оптимізовані під архітектуру Cortex-M математичні функції.

Отже, проведений аналіз доводить, що найбільш доцільним рішенням є використання мікроконтролера STM32F4 у поєднанні з цифровою аудіопериферією I2S та архітектурою Bare-metal. Така комбінація ресурсів створює надійну основу для подальшого апаратного та програмного проектування системи у наступних розділах роботи.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						19
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

### 2.1 Розробка узагальненої структури комп'ютерної системи

Після проведення аналізу існуючих методів цифрової обробки звуку, визначення жорстких часових вимог та обґрунтування вибору елементної бази виконується етап структурного проєктування системи модифікації голосу. Розробка узагальненої структури є одним із ключових етапів створення вбудованих комп'ютерних систем. Саме на цьому рівні визначається склад функціональних блоків, їхнє логічне призначення та топологія інформаційних зв'язків між підсистемами. Головною вимогою до узагальненої структури є забезпечення безперервного та абсолютно детермінованого потоку аудіоданих від моменту їх захоплення мікрофоном до відтворення після виконання математичної обробки.

У структурі проєктованої системи доцільно виділити чотири базові вузли: підсистему введення аудіосигналу, центральний обчислювальний та керуючий блок, підсистему виведення звуку, а також підсистему взаємодії з користувачем (рис. 2.1). Такий модульний підхід дозволяє виконати чіткий функціональний розподіл задач між окремими апаратними компонентами та суттєво спростити подальше принципове проєктування системи.

Підсистема введення аудіосигналу призначена для точного перетворення звукових коливань у безперервний цифровий потік даних, придатний для подальшої математичної обробки. Як первинний сенсор тут виступає цифровий MEMS-мікрофон. Завдяки тому, що аналого-цифрове перетворення виконується безпосередньо всередині корпусу мікросхеми мікрофона, система стає максимально захищеною від зовнішніх електромагнітних завад та шумів друкованої плати. Передача оцифрованих

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Петрик М.А.</i>			<b>Проектна частина</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Тиш Є.В.</i>				<i>Н</i>	<i>20</i>	
<i>Реценз.</i>		<i>Суприк Г.Б.</i>				<b>ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42</b>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Луцик Н.С.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Осухівська Г.М.</i>						

аудіоданих здійснюється через спеціалізовану цифрову звукову шину I2S. Вона гарантує апаратно синхронізований обмін аудіопотоками між периферією та контролером без ризику втрати відліків.

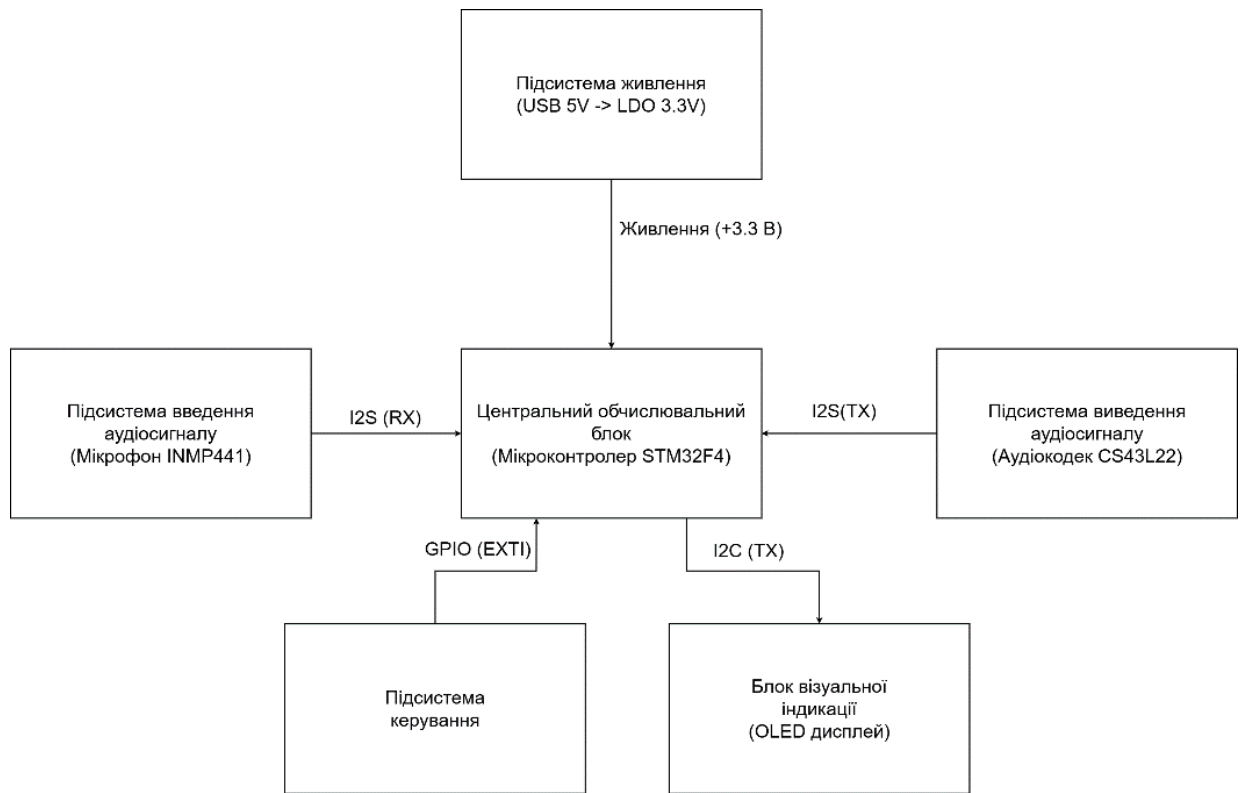


Рисунок 2.1 – Структурна схема комп'ютерної системи модифікації голосу

Центральний обчислювальний та керуючий блок реалізується на базі мікроконтролера сімейства STM32F4 з архітектурою ядра ARM Cortex-M4 [9]. Це ядро містить апаратний модуль обчислень з плаваючою комою FPU, що дозволяє в разі прискорити виконання тригонометричних операцій та цифрової фільтрації. Для зберігання масивів аудіобуферів, службових структур та проміжних результатів спектрального аналізу використовується внутрішня статична оперативна пам'ять SRAM. Ефективна взаємодія між процесорним ядром, пам'яттю та периферійними модулями забезпечується за допомогою внутрішньої багатопланової матриці системних шин АНВ та АРВ.

Надзвичайно важливим функціональним вузлом у цій структурі виступає контролер прямого доступу до пам'яті DMA. Його використання

дозволяє апаратно пересилати аудіодані між периферійними шинами I2S та оперативною пам'яттю без жодного втручання центрального процесора. Завдяки цьому процесорне ядро повністю звільняється від рутинних операцій копіювання байтів і може направити сто відсотків своєї обчислювальної потужності на алгоритми Pitch Shifting.

Підсистема виведення аудіосигналу відповідає за зворотне перетворення модифікованого масиву даних у фізичний звук. Після завершення обчислень готовий аудіопотік через вихідний канал I2S безперервно передається до зовнішнього аудіокодека. У цьому вузлі цифрові дані перетворюються в аналоговий сигнал, який одразу проходить через апаратний низькочастотний фільтр. Фільтрація є обов'язковим етапом для згладжування сходинок квантування та усунення високочастотного шуму. Лише після цього відновлений сигнал надходить на роз'єм для підключення навушників або зовнішньої акустики.

Для налаштування режимів роботи пристрою передбачена підсистема взаємодії з користувачем. До її апаратного складу входять тактові кнопки керування, за допомогою яких виконується зміна коефіцієнта зсуву тональності голосу в більшу або меншу сторону. Ключовою вимогою до цієї підсистеми є те, що зміна параметрів має оброблятися через зовнішні переривання ЕХТІ без жодного блокування чи зупинки основного аудіотракту.

Головною особливістю розробленої узагальненої структури є організація потоків даних на основі жорсткого апаратного паралелізму. Поки один канал DMA виконує запис свіжих вибірок звуку від мікрофона безпосередньо в пам'ять, процесорне ядро здійснює цифрову обробку попереднього буфера. Одночасно з цим другий канал DMA передає вже оброблений третій буфер до підсистеми відтворення. Завдяки матриці системних шин ці процеси фізично не заважають один одному. Така організація зводить наскрізну затримку системи до фізіологічного мінімуму і гарантує безперебійну роботу в режимі реального часу.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						22
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Отже, у результаті макропроектуювання було сформовано узагальнену структуру комп'ютерної системи модифікації голосу. Запропонована архітектура логічно розділяє функції введення, цифрової обробки, виведення та керування, що створює надійну основу для подальшого вибору конкретної елементної бази пристрою та розробки принципової електричної схеми.

## 2.2 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення

Після розробки узагальненої структури комп'ютерної системи виникає необхідність вибору конкретної елементної бази. Вона має гарантувати реалізацію поставлених функціональних вимог. Вибір апаратних компонентів здійснюється з урахуванням особливостей цифрової обробки звуку в режимі реального часу, жорстких обмежень щодо наскрізної затримки та вимог до якості аудіотракту. Основними критеріями вибору є обчислювальна продуктивність, наявність спеціалізованої периферії, підтримка прямого доступу до пам'яті, енергоефективність та доступність програмних бібліотек для DSP-алгоритмів.

Оскільки система повинна виконувати безперервну модифікацію голосу, критичного значення набуває вибір платформи, здатної обробляти математику без перевантаження процесорного ядра. Додатково необхідно забезпечити надійне захоплення та відтворення звуку з мінімальним впливом електромагнітних завад на друкованій платі. З огляду на це було проведено детальний аналіз доступних мікроконтролерів та аудіопристроїв, результати якого сформували остаточну апаратну конфігурацію пристрою.

### 2.2.1 Вибір мікроконтролера та аудіопериферії

Центральним елементом проєктованої системи є мікроконтролер. Він виконує функції керування периферією, організації потоків даних та реалізації самих алгоритмів Pitch Shifting. Враховуючи необхідність виконання складної математики на льоту, було обрано мікроконтролер STM32F407VGT6,

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

побудований на базі 32-бітної архітектури ARM Cortex-M4. Він працює на тактовій частоті до 168 МГц та містить апаратний співпроцесор FPU. Це дозволяє миттєво виконувати операції з плаваючою комою, характерні для цифрової фільтрації та спектрального аналізу.

Додатковою перевагою обраного мікроконтролера є апаратна підтримка DSP-інструкцій. Вони оптимізовані для виконання операцій множення та накопичення, що забезпечує рівень продуктивності, порівнянний зі спеціалізованими цифровими сигнальними процесорами. Для організації безперебійного аудіотракту мікроконтролер має кілька незалежних контролерів DMA та інтерфейсів I2S, що забезпечує пряме підключення цифрових мікрофонів і ЦАП без проміжних перетворювачів.

Для спрощення макетування доцільно використати відлагоджувальну плату STM32F407G-DISC1 (рис. 2.2). Вона містить вбудований програматор ST-LINK, схеми живлення та розведену периферію, що дозволяє скоротити час розробки та зосередитися на програмному забезпеченні.

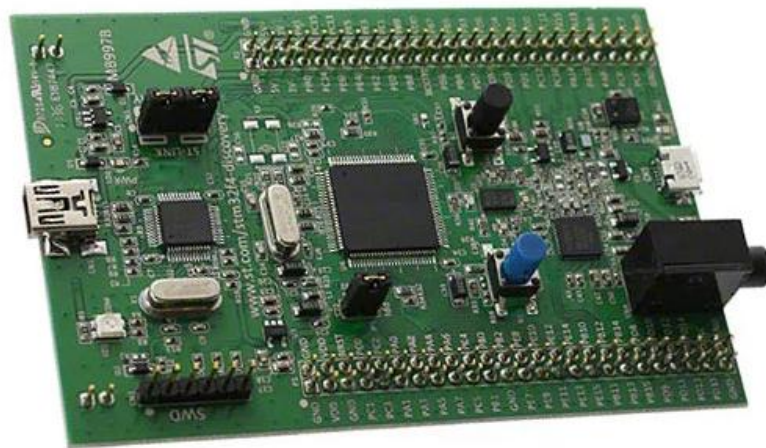


Рисунок 2.2 – Відлагоджувальна плата сімейства STM32F4 Discovery

Наступним елементом є пристрій захоплення звуку. Класичні аналогові мікрофони потребують зовнішніх підсилювачів, а їхні сигнальні лінії збирають усі паразитні шуми плати. Тому ідеальним рішенням є використання цифрового MEMS-мікрофона INMP441 (рис. 2.3) [10].

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

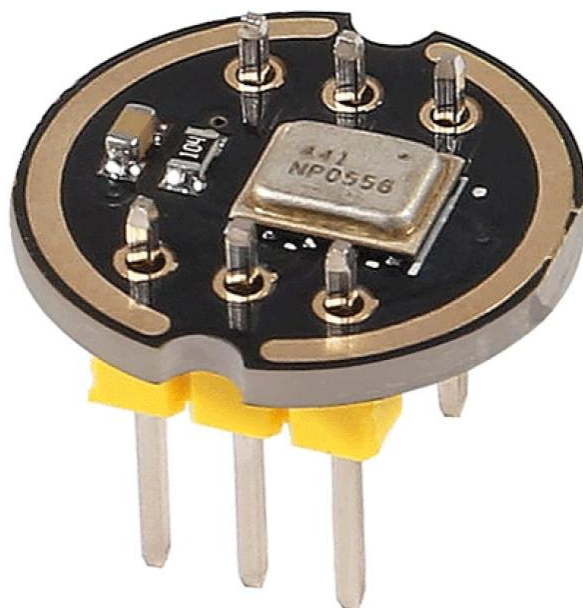


Рисунок 2.3 – Модуль цифрового MEMS-мікрофона INMP441

Цей мікрофон містить вбудований АЦП і видає готовий цифровий потік даних через інтерфейс I2S. Його показник співвідношення сигнал/шум перевищує 60 дБ, що гарантує високу якість захоплення мовлення. Завдяки повністю цифровому тракту виключається необхідність проектування аналогових схем та кардинально підвищується завадостійкість системи.

Для виведення модифікованого аудіосигналу використання вбудованого ЦАП мікроконтролера є недостатнім через високий рівень шумів та низьку роздільну здатність. З огляду на це було обрано зовнішній аудіокодек CS43L22, який розпаяний безпосередньо на платі STM32F4 Discovery (або його функціональний аналог UDA1334A) [11]. Цей кодек працює по шині I2S із розрядністю 16 або 24 біти та містить вбудований підсилювач для навушників, що забезпечує студійну якість відтворення звуку.

Таким чином, апаратний комплекс системи базується на мікроконтролері STM32F407VGT6, мікрофоні INMP441 та аудіокодеку CS43L22. Ця конфігурація формує ідеальну цифрову екосистему, яка працює за маршрутом: I2S → DMA → SRAM → DSP → SRAM → DMA → I2S. Такий

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підхід повністю усуває проміжні аналогові перетворення сигналу та гарантує виконання жорстких часових вимог, характерних для систем реального часу.

### 2.3 Обґрунтування вибору програмного забезпечення

Після визначення апаратної бази наступним кроком є вибір програмного забезпечення. Воно має забезпечувати ефективну взаємодію з апаратурою та реалізацію алгоритмів цифрової обробки сигналів на "залізі". Для систем жорсткого реального часу програмна частина має гарантувати стовідсоткову детермінованість обчислень, раціональне використання ресурсів процесора та відсутність витоків пам'яті. Навіть незначне порушення часових вимог під час виконання коду призведе до переповнення буферів I2S, що викличе аудіоартефакти (тріск) або втрату частини звукового потоку.

При виборі інструментарію необхідно максимально використати архітектурні особливості мікроконтролера STM32F4: наявність апаратного FPU, підтримку DSP-інструкцій та можливості паралельної роботи контролерів DMA. З огляду на це було виконано аналіз доступних середовищ розробки, апаратних драйверів та спеціалізованих математичних бібліотек.

#### 2.3.1 Вибір середовища розробки та бібліотек цифрової обробки сигналів (DSP)

Для написання мікропрограми (прошивки) розроблюваної системи було обрано мову програмування C (стандарти C99/C11) з можливістю використання окремих елементів C++. Мова C є абсолютним галузевим стандартом для вбудованих систем. Вона дозволяє генерувати ефективний машинний код із мінімальними накладними витратами, що є критично важливим для обробки звуку. Це дає повний контроль над розподілом оперативної пам'яті (SRAM) та роботою з регістрами мікроконтролера.

При побудові програмної архітектури було обрано підхід Bare-metal. Це означає, що програма працює без використання операційної системи

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реального часу (RTOS). Попри те, що системи на кшталт FreeRTOS зручні для керування багатозадачністю, вони неминуче витрачають процесорний час на перемикання контексту задач і роботу планувальника. Оскільки головна мета проєкту - мінімальна затримка звуку, найкращим рішенням є саме Bare-metal, де обробка подій відбувається виключно через апаратні переривання (IRQ) та контролери DMA.

Як основне інтегроване середовище розробки (IDE) було обрано STM32CubeIDE (рис. 2.4).

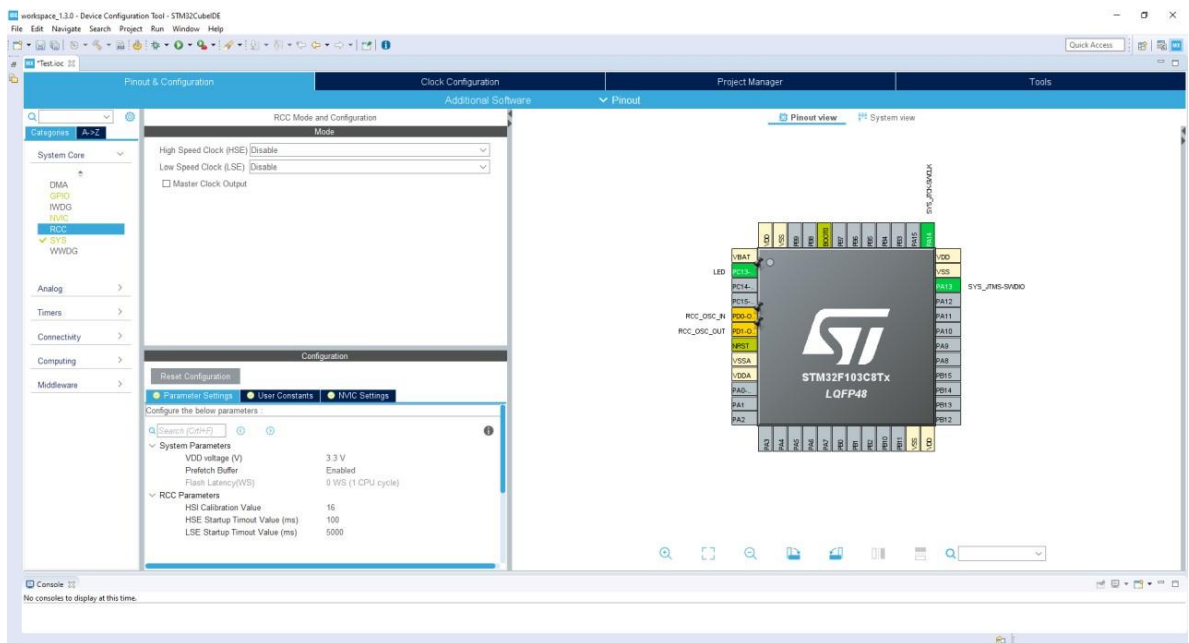


Рисунок 2.4 – Інтегроване середовище розробки STM32CubeIDE

Це офіційне безкоштовне середовище від компанії STMicroelectronics. Воно базується на компіляторі GCC, який забезпечує найвищий рівень оптимізації коду. Важливою перевагою є наявність вбудованої утиліти STM32CubeMX. Вона дозволяє візуально налаштувати дерево тактування мікроконтролера, сконфігурувати периферійні модулі та автоматично згенерувати стартовий код мовою C. Це суттєво зменшує ймовірність помилок на етапі ініціалізації обладнання. Також IDE ідеально інтегрується з відлагоджувачем ST-LINK для покрокового тестування коду безпосередньо на платі.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Для взаємодії коду з апаратними ресурсами було обрано комбінований підхід до драйверів. Для початкової ініціалізації периферії та налаштування тактування використовується бібліотека HAL (Hardware Abstraction Layer). Вона пришвидшує розробку завдяки зручним високорівневим функціям. Однак для критичних до швидкості ділянок (таких як обробники переривань DMA та шини I2S) використання HAL є занадто повільним. Тому в цих місцях застосовуються оптимізовані драйвери Low-Layer (LL) або прямий запис констант у регістри мікроконтролера.

Найважливішим компонентом проєкту є бібліотека для обробки звуку. Створення власних реалізацій складних математичних алгоритмів з нуля є неефективним і не гарантує оптимальної швидкодії. Тому для розрахунків було інтегровано спеціалізовану бібліотеку ARM CMSIS-DSP.

Ця бібліотека розроблена безпосередньо творцями архітектури ARM Cortex-M. Вона містить величезний набір готових оптимізованих функцій: цифрові фільтри, алгоритми швидкого перетворення Фур'є (FFT) та засоби векторної обробки масивів даних. Головна фішка CMSIS-DSP полягає в тому, що вона автоматично задіює можливості апаратного співпроцесора FPU та спеціальні SIMD-інструкції ядра Cortex-M4. Завдяки цьому математичні маніпуляції над звуком виконуються за мінімальну кількість тактів, залишаючи процесору час на інші завдання.

Отже, для програмної реалізації комп'ютерної системи обрано комбінацію мови C (архітектура Bare-metal), середовища STM32CubeIDE, драйверів HAL/LL та математичної бібліотеки CMSIS-DSP. Цей стек технологій гарантує максимальну швидкість та дозволяє реалізувати складні алгоритми Pitch Shifting з дотриманням найжорсткіших вимог реального часу.

## 2.4 Проєктування апаратної частини комп'ютерного засобу

На етапі апаратного проєктування виконується розробка логічних та електричних зв'язків між усіма вузлами комп'ютерної системи модифікації

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

голосу в реальному часі. Основною метою цього етапу є організація надійних каналів передачі аудіоданих та забезпечення стабільного живлення компонентів.

Перед розробкою принципової електричної схеми логіка маршрутизації даних відображається на функціональній схемі системи (рис. 2.5). Вона наочно демонструє конвеєр обробки: аудіодані від мікрофона через інтерфейс I2S захоплюються контролером DMA, розміщуються в буферах оперативної пам'яті SRAM, обробляються ядром Cortex-M4 і повертаються через DMA на вихідний інтерфейс I2S до аудіокодека.

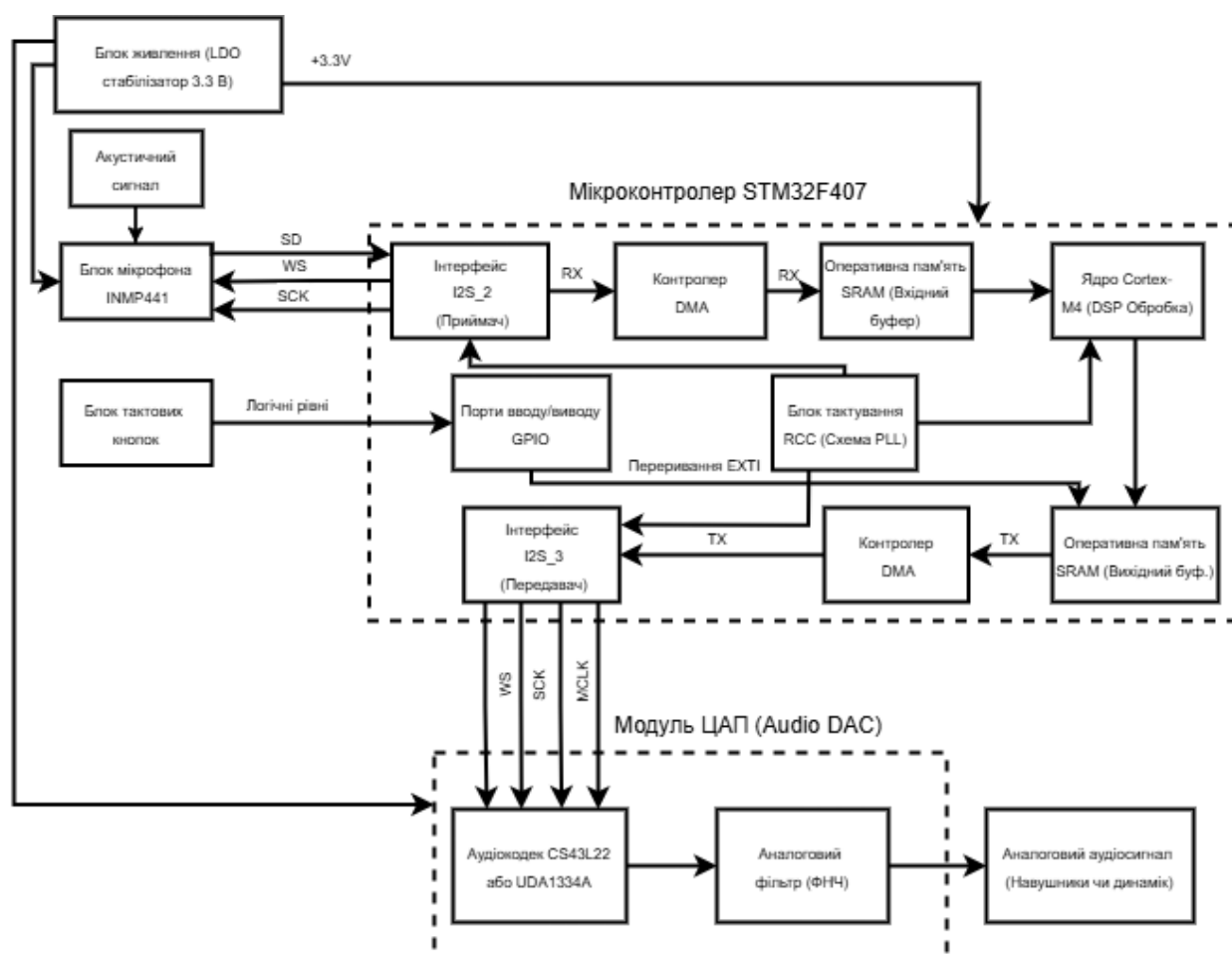


Рисунок 2.5 – Функціональна схема комп'ютерної системи

Наступним кроком є розробка електричної принципової схеми. Її доцільно виконувати у спеціалізованому середовищі автоматизованого проєктування електронних пристроїв, зокрема Altium Designer. Під час

розробки особлива увага приділяється забезпеченню цілісності високочастотних сигналів I2S та мінімізації впливу перешкод на аналоговий аудіотракт.

Відповідно до функціональної структури було запроєктовано підсистему введення на базі цифрового MEMS-мікрофона INMP441. Його підключення до мікроконтролера STM32F407 виконується виключно цифровими лініями. Для організації обміну даними використовуються: лінія WS (Word Select) для вибору лівого чи правого каналу, лінія SCK (Serial Clock) для тактування передачі та лінія SD (Serial Data) для самого потоку аудіовідліків. Вивід L/R мікрофона підключається до шини заземлення (GND), що апаратно конфігурує його для передачі даних у лівому аудіоканалі. Живлення мікрофона здійснюється від шини 3,3 В із обов'язковим встановленням розв'язувального конденсатора безпосередньо біля виводів мікросхеми.

Підсистема відтворення звуку реалізується на базі зовнішнього аудіокодека CS43L22 (або модуля UDA1334A). Передача даних до нього також здійснюється через лінії SD, SCK та WS. Однак для коректної роботи внутрішніх інтерполяційних фільтрів аудіокодека необхідно додатково підключити лінію MCLK (Master Clock), яка генерується модулем тактування мікроконтролера. Аналогова частина схеми кодека містить елементи низькочастотної фільтрації, які згладжують сходинки після цифро-аналогового перетворення. Після проходження через фільтр сигнал надходить на стандартний роз'єм 3,5 мм для підключення навушників.

Для забезпечення взаємодії з користувачем запроєктовано модуль керування на основі тактових кнопок. Вони підключаються до цифрових входів мікроконтролера (GPIO). Для формування стабільного логічного рівня використовуються підтягуючі резистори. З метою підвищення надійності та зняття навантаження з програмних алгоритмів, у схемі реалізовано апаратний захист від брязкоту контактів (debounce). Для цього застосовуються вхідні RC-

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фільтри, які ефективно пригнічують короткочасні паразитні імпульси під час механічного замикання кнопок.

Окрему увагу приділено підсистемі живлення пристрою. Як джерело первинного живлення використовується порт USB (5 В). Оскільки мікроконтролер та аудіопериферія вимагають напруги 3,3 В, у схемі застосовано лінійний стабілізатор AMS1117-3.3 з низьким падінням напруги (LDO). Він характеризується достатньою вихідною потужністю для живлення всієї системи. На вході та виході стабілізатора встановлюються танталові та керамічні конденсатори для зниження рівня пульсацій.

Для забезпечення безперебійної роботи високочастотних цифрових мікросхем у схемі передбачено блокувальні конденсатори ємністю 0,1 мкФ. Вони розміщені максимально близько до виводів живлення мікроконтролера, аудіокодека та мікрофона. Ці компоненти виконують локальну фільтрацію високочастотних завад, що виникають під час перемикавання логічних вентилів та швидкісної роботи шини I2S.

Повна електрична принципова схема розробленого комп'ютерного пристрою наведена в Додатку Г.

Таким чином, запропоноване схемотехнічне рішення повністю вирішує задачу надійного апаратного зв'язку між компонентами та створює основу для подальшої розробки програмного забезпечення, ініціалізації периферії та реалізації алгоритмів цифрової обробки звуку в наступному розділі.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

### 3.1 Реалізація програмної частини системи

Програмна реалізація комп'ютерної системи модифікації голосу в реальному часі виконана мовою програмування C у середовищі STM32CubeIDE з використанням бібліотек HAL, Low-Layer та CMSIS-DSP. Архітектура програмного забезпечення побудована за принципами подійно-орієнтованого програмування, що гарантує ефективне використання ресурсів мікроконтролера та дотримання часових вимог. Основною особливістю такої архітектури є відсутність блокуючого опитування (polling) периферії центральним процесором. Взаємодія між модулями відбувається виключно через механізм переривань та прапорців стану.

Загальний алгоритм функціонування системи наведено у вигляді блок-схеми на рисунку 3.1 на наступній сторінці. Головний цикл програми реалізовано у вигляді нескінченної конструкції while(1). У ній відбувається постійна перевірка встановлених прапорців готовності аудіобуферів.

Такий підхід дозволяє чітко розділити мікропрограму на два логічні етапи: ініціалізаційний та робочий. На першому етапі відбувається одноразове налаштування системи тактування мікроконтролера, конфігурація периферійних модулів та підготовка початкових математичних констант для віконних функцій і перетворень Фур'є. Після успішного апаратного старту мікроконтролер переходить у безперервний робочий режим, де апаратна та програмна частини функціонують паралельно і максимально автономно одна від одної. Це виключає можливість виникнення програмних блокувань (deadlocks) і гарантує абсолютну стабільність аудіотракту навіть під час інтенсивних обчислень.

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Петрик М.А.</i>			<i>Практична частина</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Тиш Є.В.</i>					32	
<i>Реценз.</i>		<i>Суприк Г.Б.</i>				<i>ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Луцик Н.С.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Осухівська Г.М.</i>						

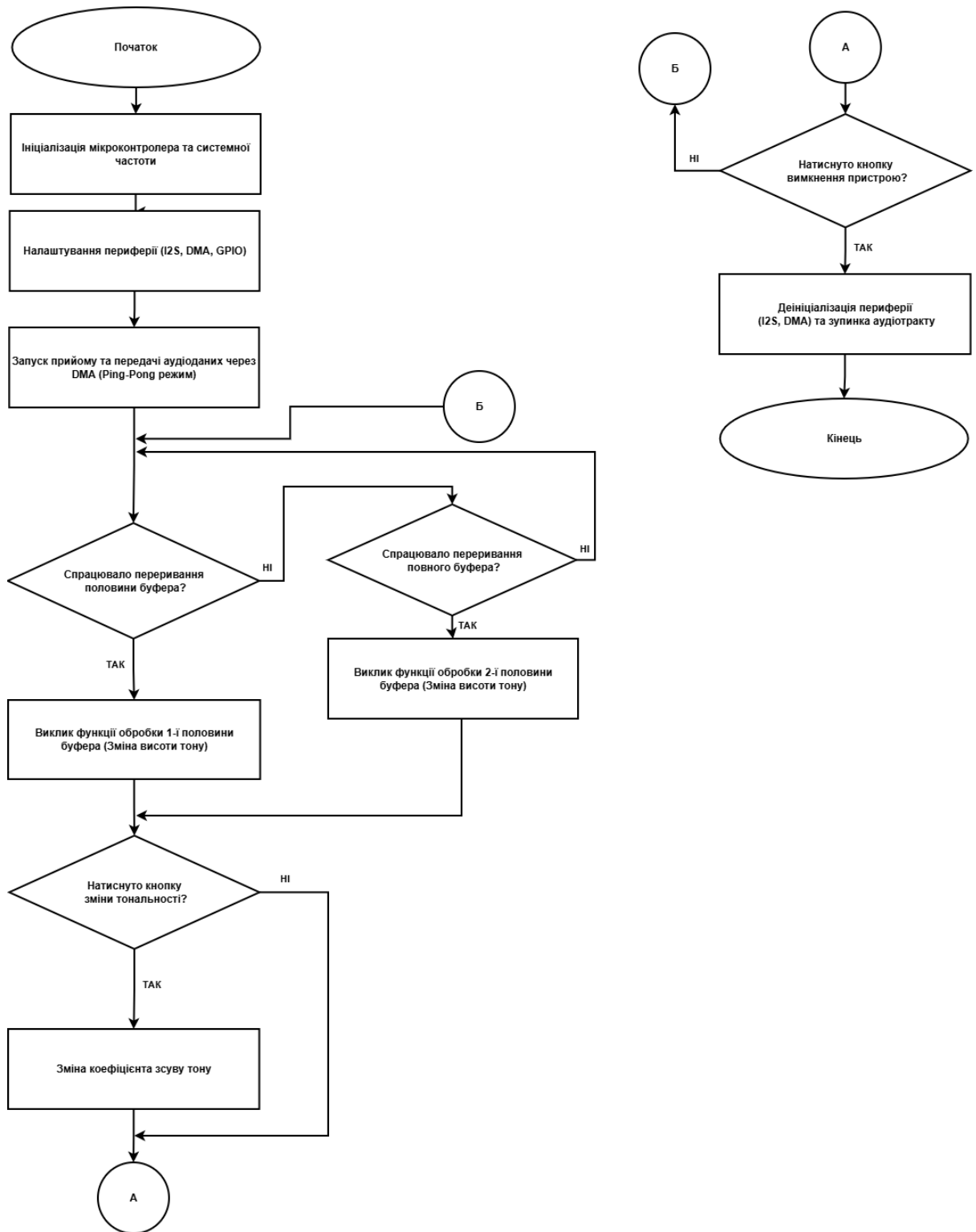


Рисунок 3.1 – Блок-схема загального алгоритму функціонування системи

### 3.1.1 Налаштування прямого доступу до пам'яті (DMA) та інтерфейсу I2S

Для забезпечення безперервного аудіопотоку було налаштовано два незалежні периферійні модулі I2S. Перший модуль (I2S\_2) працює на прийом

(RX) від цифрового MEMS-мікрофона INMP441. Другий модуль (I2S\_3) працює на передачу (TX) оброблених даних до зовнішнього аудіокодека CS43L22. Формат кадру I2S налаштовано на передачу 16-бітних аудіоданих у складі 32-бітного фрейму, що є стандартом Philips [29]. Частота дискретизації жорстко зафіксована на рівні 16 кГц, що є оптимальним для обробки людського мовлення.

Генерація точних тактових сигналів для I2S здійснюється внутрішнім модулем PLL мікроконтролера (схема ФАПЧ). Отриманий від мікрофона аудіопотік автоматично надходить до приймального буфера SRAM через канал DMA. Аналогічно, оброблений сигнал забирається з вихідного буфера іншим каналом DMA і транспортується до ЦАП.

Ключовим елементом безперебійної роботи є налаштування каналів DMA у циклічному режимі (Circular mode) для реалізації подвійної буферизації Ping-Pong. У пам'яті виділяється один великий суцільний масив, який логічно ділиться навпіл. Контролер DMA послідовно заповнює ці області новими даними, автоматично переходячи на початок після досягнення кінця масиву.

Логіка апаратної синхронізації базується на послідовному генеруванні двох типів подій. Після повного заповнення першої половини буфера апаратно генерується переривання Half-Transfer Callback (HT). У відповідному обробнику встановлюється прапорець готовності, який сигналізує програмі про наявність нових даних. Поки головний цикл while(1) виконує математичну обробку цієї першої половини, контролер DMA продовжує автономно записувати вхідний звук у другу половину буфера без жодного втручання процесора. Згодом, після завершення заповнення другої половини, формується переривання Full-Transfer Callback (FT). У цей момент процесор перемикається на обробку вже другої частини масиву, тоді як DMA автоматично переходить на початок і знову починає запис нових відліків у першу половину.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичний аналіз доводить, що така циклічна передача аудіоданих паралельно з математичною обробкою мінімізує час простою процесора та повністю усуває ризики виникнення аудіоартефактів та розривів звукового потоку.

### 3.1.2 Розробка алгоритму зміни спектральних характеристик (Pitch Shifting)

Алгоритм обробки запускається відразу після встановлення прапорця переривання DMA. Дані від мікрофона надходять у вигляді 16-бітних цілочисельних PCM-відліків (формат q15). Безпосереднє виконання складної математики над цілими числами неминуче призведе до переповнення змінних. Тому вхідний масив відразу конвертується у формат чисел з плаваючою комою (Float32) за допомогою швидкої функції `arm_q15_to_float()` з бібліотеки CMSIS-DSP.

Для реалізації алгоритму зміни висоти тону (Pitch Shifting) було використано спектральний підхід на основі перетворення Фур'є, який забезпечує найвищу якість обробки голосу. Математична послідовність обробки розпочинається з накладання на конвертовану вибірку віконної функції Ганна. Це необхідно для зменшення явища спектрального витоку та забезпечення плавного переходу між сусідніми блоками аудіо. Після цього виконується пряме швидке перетворення Фур'є за допомогою функції `arm_rfft_fast_f32()`. На цьому етапі сигнал переходить із часової області в частотну, формуючи математичний спектр звуку.

Наступним кроком відбувається безпосередня модифікація спектра. Для зміни тональності виконується масштабування спектральних компонентів (так званих бінів) відповідно до обраного користувачем коефіцієнта зсуву. Збільшення цього коефіцієнта переносить енергетичні максимуми до вищих частот, у результаті чого голос стає вищим. Натомість зменшення коефіцієнта зміщує спектральні максимуми до нижчих частот, роблячи голос басовитішим. Після завершення модифікації спектр перетворюється назад у часову область

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

за допомогою зворотного перетворення Фур'є.

Для усунення цифрових клацань на межах блоків застосовується метод згладжування *Overlap-Add*. Згідно з цим підходом, оброблені фрагменти сигналу накладаються один на одного із заданим коефіцієнтом перекриття, формуючи безперервний вихідний аудіопотік. На фінальному етапі готовий сигнал конвертується назад у формат 16-бітних цілих чисел за допомогою функції *arm\_float\_to\_q15()*. Отримані дані записуються у вихідний буфер, звідки контролер *DMA* автоматично виштовхує їх до аудіокодека.

Завдяки використанню оптимізованих функцій бібліотеки *CMSIS-DSP* усі етапи цього складного алгоритму виконуються за допомогою апаратного співпроцесора *FPU* та *DSP*-інструкцій ядра *Cortex-M4*. Це дозволяє гарантувати виконання алгоритму в межах кількох мілісекунд, забезпечуючи роботу системи реального часу без відчутних для користувача затримок.

### 3.2 Тестування розробленої комп'ютерної системи

Після завершення розробки апаратної та програмної частин комп'ютерної системи модифікації голосу було проведено комплексне тестування з метою перевірки відповідності отриманих характеристик вимогам технічного завдання. Основною задачею випробувань було підтвердження працездатності системи в умовах реального часу, перевірка коректності функціонування алгоритму зміни спектральних характеристик голосового сигналу, а також оцінка стабільності роботи апаратних інтерфейсів. Для отримання об'єктивних результатів тестування було організовано у два етапи. На першому етапі виконувалася інструментальна перевірка часових характеристик та продуктивності системи із застосуванням цифрового осцилографа. Другий етап передбачав функціональне тестування аудіотракту шляхом обробки синтетичних тестових сигналів та зміщення тональності реального людського голосу.

Під час інструментального тестування особлива увага приділялася

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оцінці швидкодії алгоритму цифрової обробки сигналів та визначенню запасу обчислювальної продуктивності мікроконтролера. Для вимірювання часу виконання алгоритму Pitch Shifting було застосовано класичний механізм апаратного профілювання. Перед початком математичної обробки чергового аудіоблоку в обробнику переривання DMA визначений вивід мікроконтролера (GPIO) переводився у високий логічний рівень. Після завершення всіх математичних операцій та запису результату до вихідного буфера цей вивід повертався у низький логічний рівень. Таким чином на виході формувався прямокутний імпульс, фізична тривалість якого безпосередньо відповідала часу виконання алгоритму обробки (рис. 3.2).

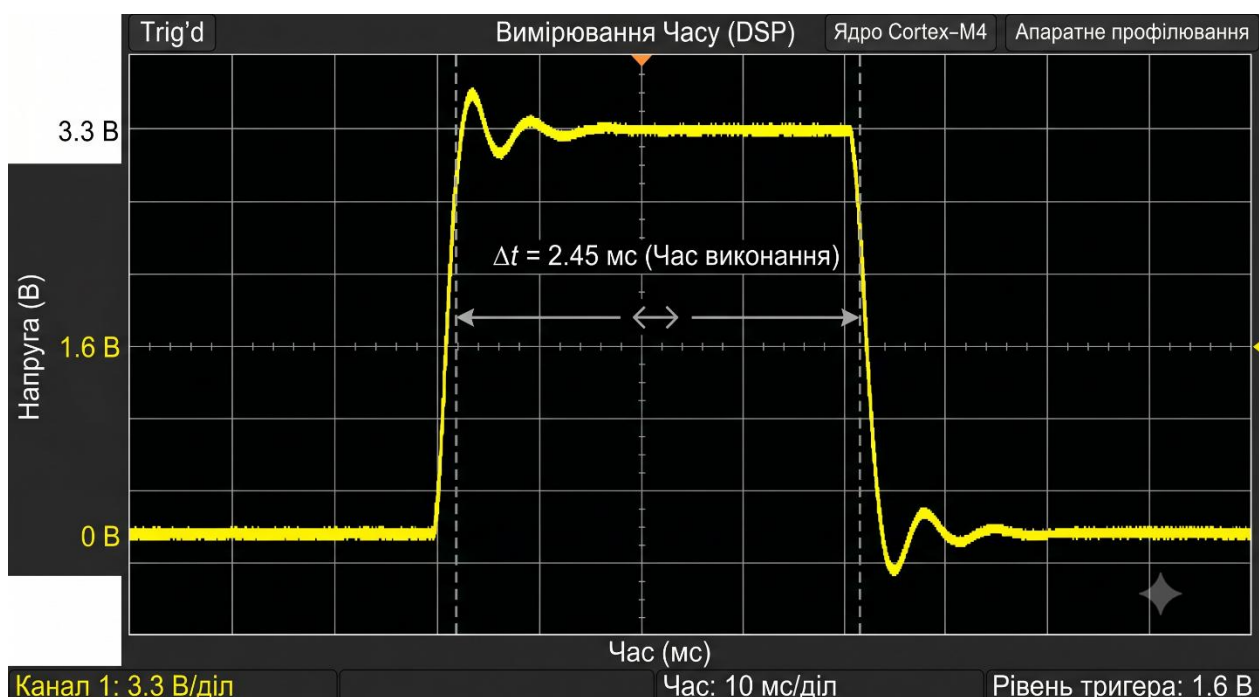


Рисунок 3.2 – Осцилограма апаратного профілювання часу виконання DSP-алгоритму

Отриманий сигнал контролювався за допомогою цифрового осцилографа. Результати вимірювань підтвердили, що час обробки одного аудіоблоку є суттєво меншим за час фізичного заповнення відповідної половини DMA-буфера. Це свідчить про наявність достатнього запасу обчислювальної потужності ядра Cortex-M4 та гарантує відсутність критичних

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ситуацій типу «buffer underrun», за яких процесор не встигає підготувати нову порцію даних до моменту її передачі на вихідний ЦАП. Аналіз осцилограм довів повну відсутність пропусків аудіоданих, що підтверджує абсолютну стабільність роботи механізму подвійної буферизації Ping-Pong у режимі Circular mode.

Додатково було проведено оцінку наскрізної затримки системи. Для цього використовувався тестовий імпульсний сигнал, який одночасно подавався на вхід аудіотракту та на перший канал осцилографа. Другий канал приладу підключався до виходу аудіосистеми після завершення всіх етапів цифрової обробки. За результатами вимірювань було встановлено, що сумарна наскрізна затримка між моментом надходження сигналу на вхід мікрофона та його появою на виході аудіокодека не перевищує 20 мс. Отримане значення повністю відповідає вимогам систем реального часу та знаходиться значно нижче фізіологічної межі, за якою людина починає сприймати затримку як акустичну луну.

Функціональне тестування аудіотракту виконувалося з використанням як гармонічних сигналів, так і реального мовлення. На етапі синтетичного тестування на вхід системи подавався ідеальний синусоїдальний сигнал із частотою 1 кГц. Встановлено, що зміна коефіцієнта алгоритму Pitch Shifting призводить до точного та передбачуваного зміщення частоти вихідного сигналу. При збільшенні коефіцієнта спостерігалось пропорційне підвищення частоти основної гармоніки, тоді як при його зменшенні відбувалося зміщення спектра в нижню частотну область. При цьому фізична тривалість тестового сигналу залишалася незмінною, що доводить коректну математичну реалізацію алгоритму зміни висоти тону без впливу на темп відтворення.

Під час випробувань із використанням людського голосу було підтверджено можливість отримання гнучких варіантів модифікації мовлення. Прослуховування результатів засвідчило відсутність виражених цифрових артефактів, імпульсних спотворень або паразитних шумів квантування. Додатково було перевірено стійкість механізму конвертації даних між

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цілочисельним форматом Q15 та форматом з плаваючою комою Float32. Аналіз вихідного сигналу показав відсутність цифрового кліппінгу (зрізання амплітуди) та переповнення розрядної сітки під час роботи функцій `arm_q15_to_float()` та `arm_float_to_q15()`.

Окремий етап випробувань було присвячено перевірці стабільності апаратного інтерфейсу керування (рис. 3.3).

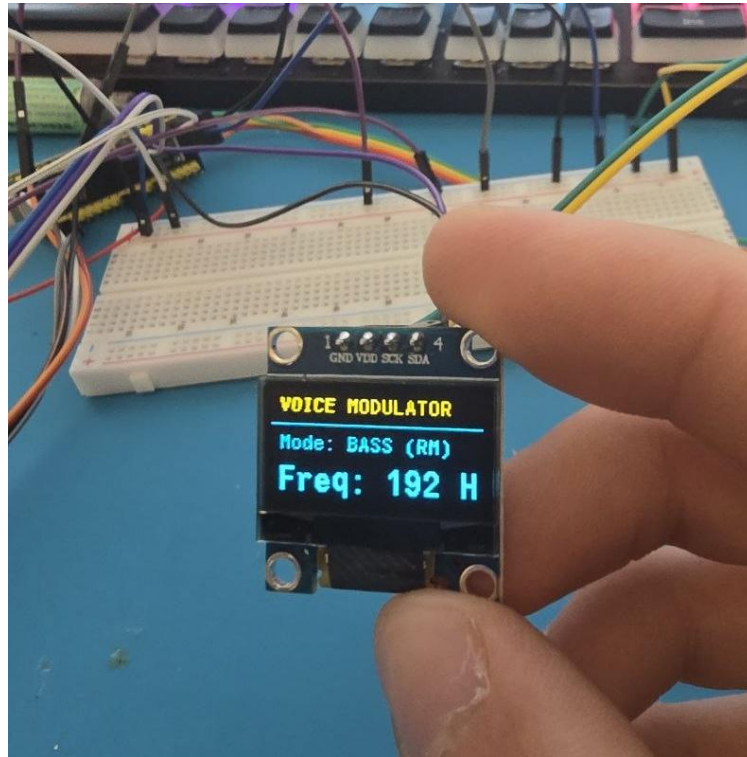


Рисунок 3.3 – Фізичний макет комп'ютерної системи під час тестування режимів модифікації голосу

Під час тестування багаторазово виконувалося перемикання режимів модифікації голосу за допомогою тактових кнопок. Було встановлено, що використання вхідних RC-фільтрів у поєднанні з програмним алгоритмом «debounce» забезпечує надійне розпізнавання натискань без хибних спрацювань. Перемикання режимів відбувалося плавно, без зупинки аудіопотоку та без появи сторонніх акустичних клацань. Важливо зазначити, що у процесі тривалого стрес-тестування не було зафіксовано жодного

апаратного виключення типу HardFault, зависань мікроконтролера або втрати синхронізації шин I2S.

Отримані результати комплексного тестування беззаперечно підтверджують працездатність розробленої комп'ютерної системи. Проведені вимірювання довели повну відповідність часових характеристик вимогам технічного завдання. Система забезпечує стабільну спектральну обробку аудіоданих без пропусків та порушень синхронізації, що робить її повністю придатною для автономної модифікації голосу в режимі реального часу.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						40
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Загальні вимоги безпеки з охорони праці для користувачів ПК

При виконанні даної кваліфікаційної роботи організовано безпечні умови праці. Основний етап розробки включав написання коду в середовищі STM32CubeIDE, проєктування схем та аналіз технічної документації. Робоче місце розробника повністю відповідає вимогам нормативних документів, зокрема НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги безпеки та захисту здоров'я під час роботи з екранними пристроями» [13]. Для зменшення впливу шкідливих факторів, таких як навантаження на зір, статична напруга м'язів та електромагнітне випромінювання, вжито відповідних практичних заходів.

Параметри навколишнього середовища в кімнаті відповідають санітарним нормам [14]. Температура повітря підтримується на рівні 22–25 °С у теплу пору року та 20–22 °С взимку. Відносна вологість становить приблизно 40–60 %, що запобігає пересиханню слизової оболонки очей під час тривалої роботи за монітором. Швидкість руху повітря не перевищує 0,1 м/с, щоб уникнути протягів. Для забезпечення припливу свіжого повітря кімната регулярно провітрюється кожні дві години. Рівень шуму від системи охолодження комп'ютера та вентиляторів вимірювальних приладів не перевищує допустимих 50 дБА.

Освітлення робочої зони комбіноване, використовуються звичайні світлодіодні лампи без ефекту мерехтіння. Загальний рівень освітленості столу складає близько 400 люкс. Настільна лампа розміщена з лівого боку таким чином, щоб світло не відбивалося від екрана монітора і не засліплювало очі під час читання даташитів (datasheets) на мікроконтролер чи аудіокодек.

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Петрик М.А.			Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Тиш Є.В.				Н	41	
Консульт.		Сенчишин В.С.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-42		
Н. Контр.		Луцик Н.С.						
Затверд.		Осухівська Г.М.						

Щоб уникнути проблем із поставою, робочий простір організовано за правилами ергономіки. Висота столу становить 725 мм, під ним є достатньо вільного простору для ніг (ширина 500 мм, глибина 400 мм). У процесі роботи використовується зручне комп'ютерне крісло з підлокітниками та можливістю регулювання висоти й нахилу спинки. Монітор встановлено на відстані 650 мм від очей, при цьому погляд падає на екран трохи зверху вниз (під кутом близько 15 градусів). Це дозволяє тримати спину рівно і не перенапружувати шийний відділ хребта під час тривалого пошуку помилок у програмному коді.

Електробезпека комп'ютеризованого робочого місця забезпечується тим, що всі металеві частини обладнання (корпус системного блоку, монітор) підключені до захисного заземлення [15]. Кабелі живлення, інтерфейсні шнури та проводи від периферії акуратно стягнуті кабельними стяжками і прокладені за столом, щоб їх неможливо було випадково пошкодити чи зачепити ногою. Крім того, лінія живлення лабораторного столу обладнана пристроєм захисного відключення (ПЗВ), який миттєво вимикає струм у разі виникнення витоку на корпус.

Для збереження високої працездатності дотримується правильний режим праці та відпочинку. Безперервна робота за екраном монітора триває не довше двох годин. Кожні 50 хвилин активного програмування робиться регламентована перерва на 10 хвилин. У цей час виконується легка розминка для зняття напруги з плечового пояса та кистей рук (для профілактики тунельного синдрому), а також гімнастика для очей: переведення погляду на віддалені об'єкти за вікном. Такий підхід гарантує безпечне та ефективне виконання роботи.

4.2 Техніка безпеки при проведенні електричних вимірювань та випробувань установки.

Практична частина роботи включала пайку контактів, збірку макета на безпайковій платі (breadboard), прошивку через програматор ST-Link V2,

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

тестування алгоритмів модифікації голосу та проведення електричних вимірювань. Хоча сама відлагоджувальна плата мікроконтролера STM32, MEMS-мікрофон (INMP441) та дисплей працюють від низької і безпечної напруги 3,3 В або 5 В (через USB), осцилограф і паяльна станція живляться від промислової мережі 220 В. Тому під час випробувань суворо дотримуються правила техніки безпеки [16].

Щоразу перед увімкненням лабораторного стенда проводиться візуальний огляд робочого місця. Вимірювальні прилади підключаються до мережі лише через розетки із заземлювальним контактом. Використання старих подовжувачів або перехідників без заземлення повністю виключено, оскільки у випадку внутрішнього пробоя ізоляції це може призвести до появи небезпечної напруги на металевому корпусі осцилографа.

Оскільки макет системи зібраний з використанням великої кількості гнучких з'єднувальних провідників, увага приділяється акуратності монтажу. Провідники не переплітаються з кабелями живлення. Будь-які маніпуляції з макетною платою, наприклад, перепідключення дротів мікрофона, зміна конфігурації кнопок або заміна аудіомодуля, виконуються тільки після того, як плата повністю відключена від програматора ST-Link або джерела живлення. Це гарантує, що випадкове коротке замикання сусідніх контактів не спалить порти мікроконтролера.

Під час зняття осцилограм із високочастотної цифрової шини I2S щупи підключаються до виводів мікроконтролера за допомогою спеціальних прецизійних вимірювальних гачків-кліпс. «Земляний» крокодил щупа осцилографа фіксується виключно на загальному контакті GND, щоб уникнути короткого замикання між сигнальною лінією та живленням.

Окрему увагу приділено захисту елементної бази від електростатичного розряду (ESD), який накопичується на одязі та може легко пробити ізолюючий шар затворів польових транзисторів STM32 або ніжну мембрану цифрового мікрофона. На столі розміщено антистатичний килимок, з'єднаний із контуром заземлення через струмообмежувальний резистор номіналом 1 МОм. Під час

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

ручної пайки контактних гребінок (header pins) до модулів використовувалася заземлена паяльна станція, а в приміщенні вмикалася примусова витяжна вентиляція для видалення шкідливих парів флюсу. Також використовувався індивідуальний антистатичний браслет, щоб безпечно знімати заряд із тіла.

Оскільки комп'ютерна система працює з обробкою звуку в реальному часі за допомогою перетворень Фур'є та DMA, завжди існує ризик програмних збоїв під час налагодження буферів. Такі помилки можуть призвести до цифрового «перевантаження» (кліппінгу), різкого високочастотного писку або максимального рівня гучності на виході аудіокодека. Для безпеки органів слуху розробника навушники ніколи не одягаються на голову до повної ініціалізації пристрою. Спочатку апаратна гучність на підсилювачі виводиться на мінімум, макет кладеться на стіл, запускається прошивка, і лише після візуального підтвердження (на дисплеї) та отримання стабільного тестового звуку навушники можна використовувати за призначенням.

На випадок непередбачених або аварійних ситуацій (наприклад, поява запаху павленої ізоляції, сильне нагрівання стабілізатора напруги на платі чи коротке замикання) передбачено чіткий алгоритм дій. Лабораторний стенд обладнано загальним вимикачем на мережевому фільтрі, який дозволяє миттєво знеструмити все обладнання. У кімнаті на видному місці розташований вуглекислотний вогнегасник, безпечний для гасіння електроустановок під напругою, а також укомплектована медична аптечка для надання першої допомоги.

Таким чином, під час виконання даної кваліфікаційної роботи на всіх етапах - від написання коду до пайки та інструментального тестування - були повністю дотримані вимоги безпеки. Комплексний підхід до організації безпечного робочого місця, правильне поводження з вимірювальною технікою та антистатичний захист створили надійні умови для успішного виконання практичної частини без ризику травматизму та пошкодження обладнання.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено задачу розробки автономної комп'ютерної системи модифікації голосу в режимі жорсткого реального часу. Мета роботи повністю досягнута.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1) Обґрунтовано вибір мікроконтролера архітектури ARM Cortex-M4 (STM32F4) та алгоритму Pitch Shifting на базі швидкого перетворення Фур'є (FFT) для забезпечення швидкої цифрової обробки звуку.

2) Розроблено апаратну архітектуру та електричні схеми системи, що надійно об'єднують мікроконтролер, цифровий MEMS-мікрофон (INMP441) та аудіокодек через інтерфейс I2S.

3) Створено оптимізоване програмне забезпечення. Використання контролера DMA (механізм подвійної буферизації Ping-Pong), співпроцесора FPU та бібліотеки CMSIS-DSP дозволило мінімізувати навантаження на ядро.

4) Виконано фізичне макетування пристрою. Реалізовано апаратний кнопковий інтерфейс із програмним захистом від брязкоту контактів для перемикання режимів модифікації тональності без зупинки аудіотракту.

5) Проведено комплексне тестування фізичного зразка. Інструментальні вимірювання підтвердили роботу системи в реальному часі з наскрізною затримкою до 20 мс, відсутність акустичних артефактів, втрат даних та повну відповідність вимогам технічного завдання.

Здобуті теоретичні та практичні результати підтверджують абсолютну працездатність створеного апаратно-програмного комплексу. Розроблена комп'ютерна система довела свою ефективність на практиці, є повністю готовою до використання як автономний пристрій, а також має значний потенціал для подальшого масштабування та розширення функціоналу.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жаровський Р.О., Луцик Н.С., Осухівська Г.М., Паламар А.М., Тиш Є.В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 39 с.
2. Лупенко С.А., Пасічник В.В., Тиш Є.В. Комп'ютерна логіка. Навчальний посібник. Львів: Видавництво «Магнолія 2006», 2024. 354 с.
3. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ. 2019. 150 с.
4. Панасенко С.М., Луцик Н.С. Інтеграція Rule-Based алгоритмів та методів машинного навчання для підвищення точності тестування електроніки. Актуальні задачі сучасних технологій: Матеріали XIV Міжнародної наук.-техн. конф. молодих учених та студентів ТНТУ ім. І.Пулюя (11-12 грудня 2025). Тернопіль, 2025. с.324.
5. Панасенко С., Луцик Н. Адаптивна ідентифікація дефектів електронних компонентів в умовах невизначеності номіналів. Інформаційні моделі, системи та технології: Матеріали XIII наук.-техн. конф. ТНТУ ім. І.Пулюя (17-18 грудня 2025). Тернопіль, 2025. с. 71.
6. Рожик А.М., Жаровський Р.О. Методи та програмно-апаратні засоби ідентифікації працівників з метою визначення робочого часу та доступу до приміщення. Збірник тез доповідей науково-технічної конференції. Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 45.
7. Слюз І., Жаровський Р. Критерії ефективності тестування комп'ютерної інформаційної системи. Матеріали XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 174.
8. Слюз І., Жаровський Р. Принципи та основні етапи комплексного тестування комп'ютерної інформаційної системи. Матеріали X науково-

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі системи та технології» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 93.

9. Тиш Є.В. Порівняльний аналіз алгоритмів мінімізації детермінованих скінченних автоматів за оцінкою ефективності реалізації. Системи та технології. Том 72, № 2, 2026. С. 205-210.

10. Тиш Є.В. Узагальнений алгоритм синтезу компонентів комп'ютерних систем на основі мікропрограмних автоматів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Том 36 (75), № 1, 2025. С. 247-253.

11. Lupenko S., Orobchuk O., Stadnik N., Zozulya A. Modeling and signals processing using cyclic random functions. In Proceedings of the 13th IEEE International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). Lviv, Ukraine, 11–14 September, 2018. P. 360–366.

12. Tysh Ie. Approach And Method Of Evaluation Of The General Reliability Indicator Of Computer Systems. International Scientific Journal Computer Systems And Information Technologies. Khmelnytskyi : Khmelnytskyi National University №3. 2021. P. 74-80.

13. НПАОП 0,00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями, від 14.02.2018 року №207.

14. ДСН 3.3.6.042 – 99 „Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень”.

15. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ.

16. Жидецький В.Ц. Охорона праці користувачів комп'ютерів : підручник. Львів : Афіша, 2020. 176 с.

17. Yiu J. The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors. 3rd ed. Newnes, 2013. 600 p.

18. Noviello C. Mastering STM32. Leanpub, 2022. 981 p.

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing. 3rd ed. Prentice Hall, 2010. 954 p.
20. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, 1997. URL: <http://www.dspguide.com> (дата звернення: 10.06.2026).
21. Zölzer U. DAFX: Digital Audio Effects. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011. 612 p.
22. Reiss J. D., McPherson A. Audio Effects: Theory, Implementation and Application. CRC Press, 2014. 367 p.
23. Valvano J. W. Embedded Systems: Real-Time Interfacing to Arm Cortex-M Microcontrollers. 5th ed. 2016. 614 p.
24. White E. Making Embedded Systems: Design Patterns for Great Software. O'Reilly Media, 2011. 330 p.
25. STMicroelectronics. AN4664 Application note. I2S/I2S ext audio protocol on STM32 microcontrollers. 2017. URL: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an4664-i2si2s-ext-audio-protocol-on-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an4664-i2si2s-ext-audio-protocol-on-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf) (дата звернення: 05.06.2026).
26. STMicroelectronics. UM1905 User manual. Description of STM32F4 HAL and low-layer drivers. URL: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1905-description-of-stm32f4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1905-description-of-stm32f4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf) (дата звернення: 07.06.2026).
27. STMicroelectronics. UM1718 User manual. STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation. URL: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1718-stm32cubemx-for-stm32-configuration-and-initialization-c-code-generation-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1718-stm32cubemx-for-stm32-configuration-and-initialization-c-code-generation-stmicroelectronics.pdf) (дата звернення: 11.06.2026).
28. STMicroelectronics. PM0214 Programming manual. STM32 Cortex-M4 MCUs and MPUs programming manual. URL: [https://www.st.com/resource/en/programming\\_manual/pm0214-stm32-cortexm4-](https://www.st.com/resource/en/programming_manual/pm0214-stm32-cortexm4-)

					<i>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

mcus-and-mpus-programming-manual-stmicroelectronics.pdf (дата звернення: 08.06.2026).

29. Philips Semiconductors. I2S bus specification. 1986. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf> (дата звернення: 03.06.2026).

30. Laroche J., Dolson M. Improved phase vocoder time-scale modification of audio. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. 7, no. 3, 1999. P. 323-332.

31. Lent K. An Efficient Method for Pitch Shifting Digitally Sampled Sounds. Computer Music Journal. MIT Press, Vol. 13, No. 4, 1989. P. 65-71.

32. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. Pearson, 2009. 1144 p

33. Barr M., Massa A. Programming Embedded Systems: With C and GNU Development Tools. 2nd ed. O'Reilly Media, 2006. 301 p.

34. Бойко В. І., Жуйков В. Я., Зінковський Ю. Ф. Мікропроцесорна техніка: підручник. Київ: Кондор, 2014. 542 с.

35. Рябенський В. М., Жуйков В. Я., Гулий В. Д. Цифрова обробка сигналів: навчальний посібник. Львів: Новий Світ-2000, 2019. 372 с.

36. Сенько В. І., Панасенко М. В. Мікроконтролери: архітектура, програмування, застосування. Київ: КПІ, 2018. 350 с.

37. Омеляненко Г. В., Козловський В. В. Цифрова обробка сигналів. Київ: НАУ, 2016. 238 с.

38. Бабак В. П. та ін. Теорія сигналів: підручник. Київ: НАУ, 2021. 336 с.

39. Журавльов В. В., Журавльова Н. В. Архітектура та програмування мікроконтролерів. Навчальний посібник. Харків: ХНУРЕ, 2020. 212 с.

40. Пупена О. М. Розробка систем керування на базі мікроконтролерів ARM Cortex-M. Київ: НУХТ, 2017. 256 с.

41. Харріс Д. М., Харріс С. Л. Цифрова схемотехніка та архітектура комп'ютерів. Переклад українською. Київ: Інлінк, 2018. 700 с.

					<b>КС КРБ 123.192.00.00 ПЗ</b>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А  
Технічне завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

**“Затверджую”**

Завідувач кафедри КС

\_\_\_\_\_ Осухівська Г.М.

“2” лютого 2026 р

Комп'ютерна система модифікації голосу в реальному часі

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на 10 листках

**Вид робіт:**

Кваліфікаційна робота

На здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

**Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»**

«УЗГОДЖЕНО»

«ВИКОНАВЕЦЬ»

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент групи СІ-42

\_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Тиш Є.В.

\_\_\_\_\_ Петрик М.А.

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

**Тернопіль 2026**

## 1 Загальні відомості

### 1.1 Повна назва та її умовне позначення

Повна назва теми кваліфікаційної роботи: *«Комп'ютерна система модифікації голосу в реальному часі».*

Умовне позначення кваліфікаційної роботи: КС КРБ 123.192.00.00

### 1.2 Виконавець

Студент групи СІ-42, факультету комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Петрик М. А.

### 1.3 Підстава для виконання роботи

Підставою для виконання кваліфікаційної роботи є наказ по університету (№4/9-188 від 24.04.2026 р.)

### 1.4 Планові терміни початку та завершення роботи

Плановий термін початку виконання кваліфікаційної роботи – 26.01.2026 р.

Плановий термін завершення виконання кваліфікаційної роботи – 21.06.2026 р.

### 1.5 Порядок оформлення та пред'явлення результатів роботи

Порядок оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу здійснюється у відповідності до чинних норм та правил ISO, ЕСКД, ЕСПД та ДСТУ.

Пред'явлення проміжних результатів роботи з виконання кваліфікаційної роботи здійснюється у відповідності до графіку, затвердженого керівником роботи. Попередній захист кваліфікаційної роботи відбувається при готовності роботи – наявності пояснювальної записки та графічного матеріалу.

Пред'явлення результатів кваліфікаційної роботи відбувається шляхом захисту на відповідному засіданні ЕК, ілюстрацією основних досягнень за допомогою графічного матеріалу.

## 2 Призначення і цілі створення системи

### 2.1 Призначення системи

Комп'ютерна система, що розробляється, призначена для:

- Захоплення голосового сигналу в режимі реального часу.
- Цифрової модифікації спектральних характеристик звуку (зміни висоти тону).
- Виведення обробленого аудіосигналу на зовнішні пристрої відтворення з мінімальною наскрізною затримкою.

### 2.2 Мета створення системи

Метою кваліфікаційної роботи є розробка апаратної та програмної частин спеціалізованої вбудованої комп'ютерної системи модифікації голосу в реальному часі на основі мікроконтролера сімейства STM32F4.

### 2.3 Характеристика об'єкту

Розроблювана система призначена для автономного використання у

сфері розваг, підкастингу, стрімінгу, а також для потенційної інтеграції в сучасні цифрові системи комунікації.

### 3 Вимоги до системи

#### 3.1 Вимоги до системи в цілому

##### 3.1.1 Вимоги до структури та функціонування системи

Комп'ютерна система повинна складатись з:

- Апаратного обчислювального блоку (на базі мікроконтролера STM32).
- Підсистем введення та виведення звуку (цифровий мікрофон, аудіокодек).
- Вбудованого програмного забезпечення (прошивки), що реалізує алгоритми DSP.
- Апаратного інтерфейсу керування (кнопки користувача).

##### 3.1.2 Вимоги до способів та засобів зв'язку між компонентами системи

Основна вимога до засобів інформаційного обміну – забезпечення мінімальної затримки та відсутність втрат аудіоданих. Взаємодія між мікроконтролером та аудіопериферією повинна здійснюватися виключно через цифрову шину I2S із застосуванням контролерів прямого доступу до пам'яті (DMA).

##### 3.1.3 Вимоги до режимів функціонування системи

Для системи визначено два режими функціонування:

- нормальний режим функціонування;
- аварійний режим функціонування.

Основним режимом функціонування є нормальний режим.

Для забезпечення нормального режиму функціонування необхідно подати стабільну напругу живлення та дотримуватись умов експлуатації мікроелектронного обладнання. У цьому режимі система виконує безперервну спектральну модифікацію голосу в реальному часі. Аварійний режим функціонування характеризується апаратною відмовою периферії або виникненням критичних програмних виключень (наприклад, HardFault). При цьому мікроконтролер повинен безпечно зупинити передачу звукового потоку для запобігання генерації високочастотного шуму на виході аудіокодека.

#### 3.1.4 Вимоги по діагностуванню системи

Для діагностування системи використовуються апаратні відлагоджувачі (ST-LINK), інтегровані в середовище розробки, а також зовнішні вимірювальні прилади (осцилограф, логічний аналізатор).

Програмне забезпечення повинно підтримувати функцію апаратного профілювання алгоритмів через тестові виводи (GPIO) для можливості точного контролю часу виконання математичних операцій.

#### 3.1.5 Перспективи розвитку, проектування системи

Дана система може бути розширена завдяки імплементації додаткових математичних алгоритмів обробки звуку (наприклад, реверберація, еквалайзер або шумозаглушення). Також передбачена можливість апаратного розширення шляхом інтеграції бездротових модулів для передачі модифікованого аудіопотоку.

### 3.2 Показники призначення

Система повинна передбачати можливість масштабування. Можливості масштабування повинні забезпечуватися засобами використовуваного базового програмного і технічного забезпечення (наявність вільних портів

GPIO, ресурсів пам'яті мікроконтролера та обчислювального запасу ядра Cortex-M4).

### 3.2.1 Вимоги до надійності

Система повинна забезпечувати працездатність та відновлення своїх функцій при виникненні наступних ситуацій:

- при збоях в системі електропостачання апаратної частини (автоматичний перезапуск після відновлення живлення);
- при помилках в роботі апаратних засобів (наприклад, втрата синхронізації на шині I2S);
- при помилках, пов'язаних з програмним забезпеченням (збої в роботі апаратних переривань або драйверів HAL/LL).

Для захисту апаратури від стрибків напруги і комутаційних завад повинні застосовуватися лінійні стабілізатори напруги (LDO) та блокувальні конденсатори у колах живлення мікроконтролера і цифрової аудіопериферії.

## 3.3 Вимоги до безпеки

Зовнішні елементи технічних засобів системи, що перебувають під напругою (блоки живлення), повинні мати захист від випадкового дотику, а сама система має живитися від безпечної напруги (5 В через інтерфейс USB).

Система електроживлення повинна забезпечувати захисне вимикання при перевантаженнях і коротких замиканнях в колах навантаження.

Загальні вимоги пожежної безпеки повинні відповідати нормам на побутове мікроелектронне обладнання. У разі пожежі не мають виділятися отруйні гази і дим. Після зняття електроживлення має бути доступне застосування будь-яких засобів пожежогасіння.

### 3.3.1 Вимоги до експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і зберігання компонентів системи

Мікроклімат в приміщеннях повинен відповідати нормам виробничого мікроклімату по ДСН 3.3.6.042-99:

- температуру повітря в межах від +10°C до +35°C;
- відносну вологість повітря при 25°C в межах від 30% до 80%;
- атмосферний тиск  $760 \pm 25$  мм рт. ст.

Періодичне технічне обслуговування використовуваних технічних засобів має проводитися відповідно до вимог технічної документації, але не рідше ніж один раз на рік.

Періодичне технічне обслуговування повинно включати візуальний огляд цілісності контактів, перевірку роботи органів керування (кнопок) та аудіороз'ємів. На підставі результатів тестування мають прийматися заходи по ліквідації виявлених дефектів.

#### 3.4 Вимоги до захисту інформації від несанкціонованого доступу

Оскільки система здійснює обробку аудіоданих «на льоту» в оперативній пам'яті (SRAM) без їх довготривалого збереження, основною вимогою є захист інтелектуальної власності – вбудованого програмного забезпечення.

Компоненти підсистеми захисту повинні забезпечувати:

- блокування несанкціонованого зчитування прошивки (встановлення рівня захисту Readout Protection у флеш-пам'яті мікроконтролера);
- неможливість втручання в алгоритми цифрової обробки через зовнішні інтерфейси під час нормального режиму роботи.

##### 3.4.1 Вимоги по збереженню інформації при аваріях

Оскільки аудіопотік обробляється в режимі реального часу і не записується на постійні носії, при виникненні аварійних ситуацій (втрата живлення) поточні звукові буфери не зберігаються. Після відновлення живлення інформація про базові налаштування системи (початковий

коефіцієнт зсуву тональності) повинна коректно завантажуватися з енергонезалежної пам'яті мікроконтролера.

### 3.4.2 Вимоги по стандартизації і уніфікації

Система повинна відповідати вимогам ергономіки та будуватися на основі загальноприйнятих уніфікованих апаратних інтерфейсів (I2S для аудіоданих, стандартний аудіороз'єм 3,5 мм для виведення звуку, USB для живлення). Використовувана елементна база повинна мати необхідні сертифікати відповідності і безпеки.

### 3.4.3 Вимоги до функцій (завдань), що виконуються системою:

- безперервне захоплення голосового сигналу із цифрового мікрофона;
- математична модифікація спектра аудіоданих (Pitch Shifting) на базі перетворення Фур'є;
- забезпечення мінімальної наскрізної затримки під час виконання алгоритмів цифрової обробки (не більше 20 мс);
- виведення обробленого аудіопотоку на зовнішній пристрій відтворення (аудіокодек);
- обробка команд користувача через апаратний інтерфейс без зупинки основного аудіотракту.

## 4 Вимоги до документації

Документація повинна відповідати вимогам ЄСКД та ДСТУ.

Комплект документації повинен складатися з:

- пояснювальної записки;
- графічного матеріалу:
  - а) Структурна схема.
  - б) Блок схема роботи комп'ютеризованої системи.
  - в) Схема електрична принципова.

г) Схема електрична функціональна.

\*Примітка: У комплект документації можуть вноситися зміни та доповнення в процесі розробки.

## 5 Стадії та етапи проектування

Таблиця 1 – Стадії та етапи виконання кваліфікаційної роботи бакалавра

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання
1	Розробка технічного завдання.	26.01 – 02.02
2	<i>Робота над другим розділом «Проектна частина»</i>	03.02 – 15.02
3	<i>Робота над третім розділом «Практична частина»</i>	20.04 – 28.04
4	<i>Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»</i>	30.04 – 10.05
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	12.05 – 18.05
6	Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	20.05 – 7.06
7	Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами	8.06 – 14.06
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06 – 21.06
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	24.06

## 6 Додаткові умови виконання кваліфікаційної роботи

Під час виконання кваліфікаційної роботи у дане технічне завдання можуть вноситися зміни та доповнення.

Додаток Б  
Перелік елементів



## Додаток В

### Лістинг програмного коду комп'ютерної системи модифікації голосу

```
/**
*****
*****
* @file           : main.c
* @brief          : Система модифікації голосу в реальному часі
(Pitch Shifter)
* @author         : Petryk Maksym (CI-42)
* @board          : STM32F407G-DISC1
* @peripherals    : I2S2 (INMP441 RX), I2S3 (CS43L22 TX), DMA,
EXTI
*****
*****
*/

#include "main.h"
#include "arm_math.h"
#include <string.h>

/* Розмір буферів для подвійної буферизації (Ping-Pong) */
#define FFT_SIZE      1024
#define BUFFER_SIZE   (FFT_SIZE * 2)

/* Аудіобуфери I2S та DMA */
int16_t rx_buffer[BUFFER_SIZE];
int16_t tx_buffer[BUFFER_SIZE];

/* Буфери для обчислень CMSIS-DSP (плаваюча кома) */
float32_t float_in_buffer[FFT_SIZE];
float32_t float_out_buffer[FFT_SIZE];
float32_t fft_buffer[FFT_SIZE * 2];
```

```

float32_t window_buffer[FFT_SIZE];

/* Структура для швидкого перетворення Фур'є */
arm_rfft_fast_instance_f32 fft_handler;

/* Прапорці синхронізації з DMA */
volatile uint8_t data_ready_flag = 0;
volatile uint8_t buffer_half = 0; /* 0 - перша половина, 1 - друга
половина */

/* Параметри зсуву тональності */
volatile float pitch_shift_factor = 1.0f; // 1.0 = оригінал, >1.0
= вище (Robot), <1.0 = нижче (Bass)

/* Периферія */
I2S_HandleTypeDef hi2s2;
I2S_HandleTypeDef hi2s3;
DMA_HandleTypeDef hdma_spi2_rx;
DMA_HandleTypeDef hdma_spi3_tx;

/**
 * @brief Функція ініціалізації віконної функції Ганна
 */
void Init_Hanning_Window(void) {
    for (uint16_t i = 0; i < FFT_SIZE; i++) {
        window_buffer[i] = 0.5f - 0.5f * arm_cos_f32(2.0f * PI *
i / (FFT_SIZE - 1));
    }
}

/**
 * @brief Функція цифрової обробки аудіоблоку (DSP Processing)
 * @param in_ptr: Вказівник на вхідний масив відліків
 * @param out_ptr: Вказівник на вихідний масив відліків
 */

```

```

void Process_Audio_Block(int16_t* in_ptr, int16_t* out_ptr) {
    // 1. Конвертація цілих чисел (Q15) у плаваючу кому (Float32)
    для уникнення переповнення
    arm_q15_to_float(in_ptr, float_in_buffer, FFT_SIZE);

    // 2. Накладання віконної функції Ганна
    arm_mult_f32(float_in_buffer, window_buffer, float_in_buffer,
    FFT_SIZE);

    // 3. Пряме швидке перетворення Фур'є (FFT)
    arm_rfft_fast_f32(&fft_handler, float_in_buffer, fft_buffer,
    0);

    // 4. Масштабування спектра (Pitch Shifting)
    float32_t shifted_fft_buffer[FFT_SIZE * 2];
    memset(shifted_fft_buffer, 0, sizeof(shifted_fft_buffer));

    for (uint16_t i = 0; i < FFT_SIZE; i++) {
        uint16_t shifted_index = (uint16_t)(i *
pitch_shift_factor);
        if (shifted_index < FFT_SIZE) {
            shifted_fft_buffer[shifted_index * 2] = fft_buffer[i
* 2]; // Real
            shifted_fft_buffer[shifted_index * 2 + 1] =
fft_buffer[i * 2 + 1]; // Imaginary
        }
    }

    // 5. Зворотне швидке перетворення Фур'є (IFFT)
    arm_rfft_fast_f32(&fft_handler, shifted_fft_buffer,
float_out_buffer, 1);

    // 6. Зворотна конвертація з плаваючої коми у формат Q15
    arm_float_to_q15(float_out_buffer, out_ptr, FFT_SIZE);
}

```

```

/**
 * @brief Обробник переривання: Заповнено половину буфера DMA
 (HT)
 */
void HAL_I2S_RxHalfCpltCallback(I2S_HandleTypeDef *hi2s) {
    if (hi2s->Instance == SPI2) {
        data_ready_flag = 1;
        buffer_half = 0; // Обробляти першу половину
    }
}

/**
 * @brief Обробник переривання: Заповнено весь буфер DMA (FT)
 */
void HAL_I2S_RxCpltCallback(I2S_HandleTypeDef *hi2s) {
    if (hi2s->Instance == SPI2) {
        data_ready_flag = 1;
        buffer_half = 1; // Обробляти другу половину
    }
}

/**
 * @brief Обробник зовнішніх переривань (Кнопки зміни
 тональності)
 */
void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin) {
    // Програмний захист від брязкоту контактів (debounce)
    static uint32_t last_interrupt_time = 0;
    uint32_t interrupt_time = HAL_GetTick();

    if (interrupt_time - last_interrupt_time > 200) {
        if (GPIO_Pin == BTN_UP_Pin) {
            pitch_shift_factor += 0.1f; // Підвищення голосу
        }
    }
}

```

```

        if (pitch_shift_factor > 2.0f) pitch_shift_factor =
2.0f;
    }
    else if (GPIO_Pin == BTN_DOWN_Pin) {
        pitch_shift_factor -= 0.1f; // Пониження голосу (Bass)
        if (pitch_shift_factor < 0.5f) pitch_shift_factor =
0.5f;
    }
    last_interrupt_time = interrupt_time;
}
}

/**
 * @brief Головна функція
 */
int main(void) {
    /* Ініціалізація HAL та системної частоти */
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();

    /* Ініціалізація периферії */
    MX_GPIO_Init();
    MX_DMA_Init();
    MX_I2S2_Init(); // Мікрофон INMP441
    MX_I2S3_Init(); // Кодек CS43L22

    /* Ініціалізація алгоритмів DSP */
    arm_rfft_fast_init_f32(&fft_handler, FFT_SIZE);
    Init_Hanning_Window();

    /* Запуск циркулярного DMA для прийому і передачі аудіо */
    HAL_I2S_Receive_DMA(&hi2s2, (uint16_t*)rx_buffer,
BUFFER_SIZE);
    HAL_I2S_Transmit_DMA(&hi2s3, (uint16_t*)tx_buffer,
BUFFER_SIZE);
}

```

```

/* Нескінченний головний цикл */
while (1) {
    if (data_ready_flag == 1) {
        data_ready_flag = 0; // Скидання прапорця

        // Вмикаємо тестовий пін для апаратного профілювання
осцилографом
        HAL_GPIO_WritePin(TEST_PIN_GPIO_Port, TEST_PIN_Pin,
GPIO_PIN_SET);

        if (buffer_half == 0) {
            // Обробка першої половини буфера
            Process_Audio_Block(&rx_buffer[0],
&tx_buffer[0]);
        } else {
            // Обробка другої половини буфера
            Process_Audio_Block(&rx_buffer[FFT_SIZE],
&tx_buffer[FFT_SIZE]);
        }

        // Вимикаємо тестовий пін (кінець вимірювання часу
обробки)
        HAL_GPIO_WritePin(TEST_PIN_GPIO_Port, TEST_PIN_Pin,
GPIO_PIN_RESET);
    }
}
}

```

Додаток Г  
Схема електрична принципова

