Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІНИЙ ПРОЄКТ

Бакалавр
Освітній рівень

ПРОГРАМОВАНИЙ ГЕНЕРАТОР СИГНАЛІВ НА БАЗІ STM32

Назва теми

КПЕК.023029.01.02 ПЗ
Шифр

Галузь знань 17 "Електроніка та телекомунікації
Шифр, назва

Спеціальність 172 "Електронні комунікації та радіотехніка"
Шифр, назва

Освітня програма "Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі"
Назва

Виконав: здобувач 3 курсу, група ЕКРс-23-1 — Підпис — В. В. Зубахін
Шифр — Ініціали, прізвище

Керівник — 2.06.26 — В. І. Стецюк
Підпис, дата — Ініціали, прізвище

Нормоконтроль — 2.06.26 — В. І. Стецюк
Підпис, дата — Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій — С. К. Підченко
Підпис, дата — Ініціали, прізвище

11 06 2026 р.

Хмельницький 2026 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій
Освітній рівень: бакалавр
Галузь знань: 17 "Електроніка та телекомунікації"
Спеціальність: 172 " Електронні комунікації та радіотехніка "
Освітня програма: «Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри ТМІТ
/Підченко О.К./
Підпис, дата 21.01.26р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

Зубахіну Владиславу Володимировичу
Прізвище, ім'я, по-батькові здобувача

студент 3 курсу групи ЕКРс-23-1

1. Тема проєкту: Програмований генератор сигналу на базі STM32

Керівник проекту Стецюк В. І., к.т.н, доцент
Прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 20 січня 2026 р. № 7

2. Строк подання здобувачем проекту на кафедру 02.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту: діапазон частот –37, МГц; графічний дисплей, органи керування – енкодер, атенюатор – 0, 1, 3, 5, 10, 20, 30 dB, живлення: від USB та автономне (акумулятор LiFePO4).

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Аналітичний огляд літературних джерел і патентних матеріалів.
2. Техніко-економічне обґрунтування структурної схеми
3. Розрахунок схеми електричної принципової
4. Висновки
5. Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
1. Плакат 1. Вибір пристрою-прототипу
2. Плакат 1. Платформа розробки
3. КПТР. 023029.01.02 Е1. Схема електрична структурна
4. КПТР. 023029.01.02 Е3. Схема електрична принципова

6. Консультанти розділів кваліфікаційного проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Стецюк Віктор Іванович		
Антиплагіат	Стецюк Віктор Іванович		
Антиплагіат	Пивовар Олег Сергійович		

7. Дата видачі завдання 02.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
Отримання технічного завдання на КП	02.02.2026	Виконано
Складання графіку виконання робіт	03.02.2026	Виконано
Преддимломна практика	09.02.2026-27.02.2026	Виконано
Аналітичний огляд літературних джерел і формування 1 розділу КП	до 14.03.2026	Виконано
Написання 2 розділу КП	до 28.03.2026	Виконано
Написання 3 розділу КП	до 18.04.2026	Виконано
Формування висновків	до 25.04.2026	Виконано
Оформлення графічної частини	до 01.05.2026	Виконано
Оформлення переліку посилань	до 08.05.2026	Виконано
Оформлення пояснювальної записки КП	до 15.05.2026	Виконано
Формування презентації	до 22.05.2026	Виконано
Одержання відгуку та рецензії	до 25.05.2026	Виконано
Підготовка до захисту	до 27.05.2026	Виконано
Попередній захист КП	28.05.2026	Виконано
Перевірка на антиплагіат	до 08.06.2026	Виконано

Здобувач ____________ Підпис ____________ В. В. Зубахін
Ініціали, прізвище

Керівник проекту ____________ Підпис ____________ В. І. Стецюк
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: "Програмований генератор сигналів на базі STM32".

Автор проекту: Зубахін Владислав Володимирович

Керівник проекту: к.т.н. доцент Стецюк Віктор Іванович

Пояснювальна записка: 90 сторінок, 33 рисунки, 4 таблиці, 18 джерел.

Графічна частина: 2 плакатів, 2 креслень, 9 слайдів презентації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГЕНЕРАТОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, DDS, СИГНАЛ

Метою кваліфікаційного проекту є розробка програмованого генератора сигналів на базі мікроконтролера STM32 і DDS-синтезатора, який забезпечує формування сигналів різної форми з можливістю програмного керування їх параметрами..

Проект складається з трьох основних розділів.

У першому розділі проведено аналітичний огляд літературних джерел та патентних матеріалів, обрано та обґрунтовано вибір пристрою-прототипу.

У відповідності до технічного завдання, специфіки експлуатації, розроблена структурна схема електрична структурна пристрою.

Розроблено схему електричну принципову програмованого генератора сигналів на базі STM32. Прилад складається з плати STM32, DDS генератора, енкодера, графічного дисплея, тактового генератора, фільтра нижніх частот (ФНЧ), атенюатора та підсилювача-коректора.

Особливістю кваліфікаційного проекту є використання методу прямого цифрового синтезу DDS для формування сигналів різних форм: синусоїдального, прямокутного, трикутного та сигналу білого шуму.

В. В. Зубахін

Ініціали, прізвище здобувача

29.05.2026

Підпис, дата

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кільк.	№ екз.	Примітка
			Документація загальна			
1	А4		Завдання на дипломний проект	1	1	
2	А4		Анотація	1	1	
3	А4	КПЕК.023029.01.02 ПЗ	Програмований генератор			
			сигналів на базі STM32			
			Пояснювальна записка	1	1	90 арк.
4	А4	КПЕК.023029.01.02 ПЕ	Програмований генератор			
			сигналів на базі STM32			
			Перелік елементів	1	1	3 арк
			Документація графічна			
5	А1	КПЕК.023029.01.02 Е1	Програмований генератор			
			сигналів на базі STM32			
			Схема електрична структурна	1	1	
6	А1	КПЕК.023029.01.02 Е3	Програмований генератор			
			сигналів на базі STM32			
			Схема електрична принципова	1	1	
7	А1	Плакат 1	Вибір пристрою-прототипу	1	1	
8	А1	Плакат 2	Платформа розробки	1	1	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	КПЕК.023029.01.02 ВП			
Розроб.		Зубахін В. В.		29.05	Програмований генератор сигналів на базі STM32 Відомість дипломного проекту	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Стецюк В. І.		2.06.25		н	1	1
Н.контр.		Стецюк В. І.		2.06.25		ХНУ. гр. ЕКРс-23-1		
Затв.		Підченко С. К.						

ЗМІСТ

стр.

ВСТУП 7

1.А НАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ І ПАТЕНТНИХ МАТЕРІАЛІВ 10

1.1. Класифікація генераторів сигналів. 10

1.2. Промислові зразки генераторів сигналів.......... 15

1.3. Сучасні багатофункціональні програмовані платформи.......... 23

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 26

2. ВИБІР І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ 27

2.1. Загальна характеристика проєкту.......... 27

2.2. Порівняльний аналіз можливих варіантів реалізації 30

2.3. Економічний розрахунок витрат на розробку 36

2.4. Розробка структурної схими програмованого генератора сигналів на базі STM32 40

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 44

3. РОЗРАХУНОК СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ 45

3.1. Модуль STM32 з периферійними пристроями 45

3.2. DDS генератор 59

3.3. ФНЧ 65

3.4. Підсилювач-коректор 67

3.5. Атенюатор 69

3.6. Блок живлення 71

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 73

ВИСНОВКИ 74

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 76

ДОДАТКИ 78

Додаток А. Графічна частина 79

Додаток Б. Слайди презентації 83

ВСТУП.

Стрімкий розвиток сучасної електроніки, телекомунікаційних систем та вбудованих обчислювальних пристроїв зумовлює постійне зростання вимог до засобів вимірювання, тестування та налагодження електронного обладнання. Одним із найважливіших інструментів, що використовується під час розробки, дослідження та експлуатації електронних систем, є генератор сигналів. Такі пристрої забезпечують формування електричних сигналів різної форми, частоти та амплітуди, що дозволяє здійснювати перевірку характеристик електронних компонентів, аналіз роботи схем та моделювання реальних умов функціонування технічних систем.

Традиційні аналогові генератори сигналів характеризуються обмеженими можливостями щодо точності встановлення параметрів, стабільності частоти та гнучкості керування. У зв’язку з цим значного поширення набули цифрові методи синтезу сигналів, які забезпечують високу точність, широкий діапазон налаштувань та можливість програмного керування параметрами генерації. Однією з найбільш ефективних технологій цифрового формування сигналів є DDS (Direct Digital Synthesis – прямий цифровий синтез), що дозволяє отримувати гармонічні та інші періодичні сигнали з високою роздільною здатністю за частотою та мінімальним часом перебудови.

Принцип DDS-синтезу ґрунтується на цифровому формуванні відліків сигналу з подальшим перетворенням їх у аналогову форму за допомогою цифро-аналогового перетворювача. Завдяки використанню цифрових методів обробки забезпечується висока стабільність частоти, низький рівень похибок та можливість оперативної зміни параметрів сигналу. Це робить DDS-синтезатори особливо привабливими для використання у вимірювальній техніці, системах зв’язку, радіоелектроніці, автоматизованих системах керування та навчальному обладнанні.

Важливу роль у реалізації сучасних цифрових генераторів сигналів відіграють мікроконтролери сімейства STM32, розроблені на базі архітектури ARM Cortex-M. Дані мікроконтролери поєднують високу продуктивність, широкий набір периферійних модулів, низьке енергоспоживання та розвинені засоби програмування. Наявність інтерфейсів SPI, UART, I^2C, USB та інших комунікаційних модулів забезпечує зручне підключення зовнішніх пристроїв і компонентів, зокрема DDS-синтезаторів. Крім того, значні обчислювальні ресурси дозволяють реалізовувати складні алгоритми керування та обробки сигналів у режимі реального часу.

Поєднання можливостей мікроконтролера STM32 та DDS-синтезатора створює ефективну апаратно-програмну платформу для побудови програмованого генератора сигналів із широким функціоналом. Такий пристрій здатний формувати сигнали різної форми, включаючи синусоїдальні, прямокутні, трикутні та інші типи хвиль, забезпечуючи при цьому високу точність налаштування частоти та можливість дистанційного або локального керування. Використання програмних методів керування дозволяє реалізувати додаткові функції, такі як автоматичне сканування частотного діапазону, зміна параметрів сигналу за заданим алгоритмом, збереження налаштувань користувача та інтеграція з персональним комп’ютером.

Актуальність розроблення програмованого генератора сигналів на базі STM32 і DDS-синтезатора обумовлена необхідністю створення доступних, компактних та функціональних засобів генерації тестових сигналів. Комерційні лабораторні генератори часто мають високу вартість, що обмежує їх використання у навчальних закладах, аматорських лабораторіях та невеликих дослідницьких проєктах. Застосування сучасної елементної бази дозволяє створити пристрій із характеристиками, наближеними до професійного обладнання, при значно нижчій собівартості.

Розробка такого генератора також має практичне значення для вивчення сучасних методів цифрового синтезу сигналів, програмування мікроконтролерних

систем та організації взаємодії між цифровими і аналоговими пристроями. У процесі проєктування вирішуються задачі вибору апаратної архітектури, розробки алгоритмів керування DDS-модулем, організації користувацького інтерфейсу та забезпечення необхідних метрологічних характеристик пристрою.

Об'єктом дослідження є процес формування електричних сигналів за допомогою цифрових методів синтезу.

Предметом дослідження є програмований генератор сигналів, побудований на основі мікроконтролера STM32 та DDS-синтезатора.

Метою роботи є розробка програмованого генератора сигналів на базі мікроконтролера STM32 і DDS-синтезатора, який забезпечує формування сигналів різної форми з можливістю програмного керування їх параметрами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати сучасні методи генерації електричних сигналів та принципи роботи DDS-синтезаторів;

- здійснити аналітичний огляд і аналіз за темою кваліфікаційного проєкту;

– розробити структурну схеми пристрою;

– розробити принципову схеми пристрою.

Практична цінність роботи полягає у створенні універсального програмованого генератора сигналів, який може бути використаний для налагодження електронних схем, проведення лабораторних досліджень, навчального процесу та виконання інженерних розробок. Запропоноване рішення поєднує відносно низьку вартість реалізації, високу функціональність та можливість подальшої модернізації відповідно до вимог конкретних застосувань.

Таким чином, розроблення програмованого генератора сигналів на базі STM32 і DDS-синтезатора є актуальним технічним завданням, вирішення якого сприяє підвищенню ефективності процесів дослідження, тестування та налаштування сучасних електронних систем, а також дозволяє отримати практичний досвід створення цифрових вимірювальних пристроїв із програмним керуванням.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ І ПАТЕНТНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Класифікація генераторів сигналів.

Генератори сигналів є невід'ємною частиною будь-якої радіотехнічної лабораторії, виробничого цеху, науково-дослідної частини або навіть радіоаматора. Вони завжди випускалися промислово або розроблялися радіоаматорами за потребами. Перед тим, як почати аналіз промислових зразків, розглянемо загальну класифікацію генераторів сигналів.

Генератори сигналів – це електронні пристрої, призначені для створення електричних сигналів із заданими характеристиками (форма, частота, амплітуда). Їх класифікують за декількома основними ознаками:

1) за формою вихідного сигналу:

- синусоїдальні (гармонійні) – генерують синусоїдальний сигнал і використовуються для тестування підсилювачів та радіоприймачів, лабораторних досліджень, тощо;

- функціональні – здатні видавати декілька стандартних форм, наприклад синусоїдальну, прямокутну (меандр), трикутну, пилкоподібну;

- імпульсні – генерують послідовність прямокутних імпульсів з можливістю регулювання тривалості та шпаруватості;

- генератори довільної форми (AWG) – дозволяють створювати складні сигнали будь-якої форми, заданої користувачем.

2) за частотним діапазоном:

- низькочастотні (НЧ) – від часток Гц до сотень кГц (звуковий діапазон);

- високочастотні (ВЧ/RF) – від сотень кГц до одиниць ГГц;

- надвисокочастотні (НВЧ/Microwave) – частоти понад десятки ГГц;

3) за принципом дії та схемотехнікою:

- аналогові – використовують коливальні контури (LC-генератори) або RC-кола (забезпечують високу чистоту спектру, але мають меншу стабільність);

- цифрові, наприклад Direct Digital Synthesis (DDS) – формують сигнал шляхом прямого цифрового синтезу та відзначаються надвисокою стабільністю частоти та можливістю швидкої зміни параметрів;

4) за типом модуляції:

4.1) аналогові види модуляції:

- амплітудна (AM) – змінюється амплітуда несучої, це найпростіший вид, використовується в аматорському та авіаційному зв'язку, мовленні в діапазонах ДХ/СХ, тощо; даний вид модуляції може мати власні модифікації, наприклад односмугова модуляція (SSB, Single Sideband), яка базується на видаленні однієї з двох бічних смуг (верхньої або нижньої) або квадратурна балансна модуляція;

- частотна (FM) – змінюється частота несучої; збезпечує високу завадостійкість (УКХ-радіо;

- фазова (PM) – змінюється фаза сигналу, наприклад у супутникових видах зв’язку;

4.2) цифрові види модуляції (маніпуляція):

- амплітудна маніпуляція (ASK) – передача «0» та «1» через зміну рівня амплітуди;

- частотна маніпуляція (FSK) – кожному логічному стану відповідає своя частота; типово для Bluetooth та старих модемів;

- фазова маніпуляція (PSK) – зміна фази (наприклад, BPSK – 180°, QPSK – 90°); основний метод для супутникового зв'язку;

4.3) складна (векторна) модуляція (використовується в сучасних стандартах (4G/5G, Wi-Fi):

- квадратурна амплітудна модуляція (QAM): одночасна зміна і фази, і амплітуди; дозволяє передавати багато біт за один такт (наприклад, 256-QAM або 1024-QAM);

- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – розподіл даних між сотнями вузькосмугових підносійних частот;

4.4) імпульсна модуляція (характерна для радарів та силової електроніки):

- широтно-імпульсна (PWM/ШІМ) – змінюється тривалість (ширина) імпульсу;

- амплітудно-імпульсна (PAM) – змінюється висота імпульсів;

- фазово-імпульсна (PPM) – змінюється положення імпульсу в часі;

4.5) спеціальні види:

- ЛЧМ (LFM / Chirp) – лінійна зміна частоти всередині імпульсу; використовується в сучасних радарах та технології LoRa для збільшення дальності зв'язку;

5) за призначенням:

- вимірювальні – мають високу точність та стабільність параметрів, обов'язково проходять метрологічну повірку;

- навчальні/побутові – простіші та дешевші прилади для базових лабораторних робіт.

Одним із найбільш поширених сучасних методів формування сигналів є DDS синтез. DDS-синтезатори (Direct Digital Synthesis – прямий цифровий синтез) класифікуються за архітектурою, типом вихідного сигналу та сферами застосування. Основна відмінність від аналогових систем полягає у формуванні сигналу за допомогою цифрових обчислень, а не фізичних коливальних контурів. Тож розглянемо даний тип генераторів більш детально:

1) класифікація за архітектурою та принципом побудови:

- класичний DDS (на основі ПЗП) – використовує фазовий акумулятор і таблицю значень (ROM/ПЗП) для перетворення фази в амплітуду; це найбільш поширений тип для генерації синусоїдальних сигналів;

- DDS з інтерполяцією або обчисленням фази – замість великих таблиць ROM використовує математичні алгоритми (наприклад, CORDIC) для обчислення значень сигналу «на льоту», що економить пам'ять;

- імпульсний DDS (Pulse Output DDS / PDDS) – спрощена 1-бітна структура, що видає послідовність імпульсів; зазвичай має менший динамічний діапазон (SFDR), але простішу реалізацію;

- гібридні системи (DDS + PLL) – комбінація прямого синтезу з фазовим автопідстроюванням частоти; це дозволяє отримати високу роздільну здатність DDS на дуже високих частотах, характерних для PLL;

2) за типом вихідного сигналу:

- одноканальні – формують один сигнал заданої форми;

- квадратурні (I/Q-синтезатори) – генерують два сигнали (синфазний та квадратурний) зі зсувом фази на 90°, що критично для векторної модуляції в системах зв'язку; це найбільш поширений тип DDS генераторів, який можна використовувати і як одноканальний;

- багатоканальні – дозволяють синхронно керувати декількома виходами з точним регулюванням фазового зсуву між ними;

3) за функціональними можливостями:

- базові синтезатори частоти – призначені лише для генерації стабільної частоти з малим кроком перелаштування;

- модуляційні синтезатори – мають вбудовані блоки для виконання амплітудної (AM), частотної (FM) або фазової (PM) модуляції безпосередньо в цифровому домені;

- генератори довільної форми (AWG) – дозволяють завантажувати в пам'ять будь-яку форму сигналу, перетворюючи DDS на універсальний інструмент тестування;

4) за сферою застосування:

- комунікаційні – фокусуються на швидкій зміні частоти (Frequency Hopping) та низькому рівні фазових шумів;

- вимірювальні та індустріальні – використовуються для аналізу імпедансу, в ультразвукових датчиках та медичній техніці, де важлива програмованість та стабільність.

Сучасні рішення від виробників, таких як Analog Devices, пропонують інтегральні схеми (наприклад, серії AD9850 або AD9910), які об'єднують фазовий акумулятор та ЦАП в одному чипі.

Класичним варіантом формування сигналів є застосування методів ФАПЧ або ЧАПЧ (фазового або частотного підлаштування частоти). ФАПЧ (PLL – Phase-Locked Loop) базуються на принципі автопідстроювання фази керованого генератора під еталонний сигнал. Розглянемо класифікаційні ознаки також цього виду генераторів сигналів:

1) за архітектурою петлі зворотного зв'язку:

- цілочислові (Integer-N) – коефіцієнт ділення у зворотному зв'язку ціле число, а вихідна частота кратна кроку сітки частот; вони прості та мають низький рівень фазових шумів, але великий крок перелаштування;

- дробові (Fractional-N) – дозволяють використовувати дробові коефіцієнти ділення, що забезпечує дуже малий крок зміни частоти (до часток Гц) при високій частоті порівняння, що покращує динаміку петлі;

- трансляційні (Translation Loops) – використовують змішувач у петлі зворотного зв'язку, що дозволяє переносити стабільність низькочастотного сигналу на НВЧ-діапазон без накопичення фазового шуму, характерного для множників;

2) за реалізацією основних вузлів:

- аналогові (APLL) – всі компоненти (фазовий детектор, фільтр, генератор) аналогові; використовуються там, де потрібна максимальна чистота сигналу на екстремальних частотах;

- цифрові (DPLL) – фазовий детектор та дільники реалізовані на логічних елементах; найпоширеніший тип у сучасній мікроелектроніці;

- повністю цифрові (ADPLL) – не мають аналогових компонентів (навіть фільтр петлі цифровий); використовуються в системних чіпах (SoC) та процесорах для синхронізації ядер;

3) за типом керованого генератора (VCO):

- LC-генератори – мають вузький діапазон перелаштування, але дуже низький рівень фазового шуму, що ідеально для фіксованих частот у зв'язку;

- кільцеві генератори (Ring Oscillators) – широкий діапазон частот, легко інтегруються в цифрові мікросхеми, але мають вищий рівень шуму;

- YIG генератори – забезпечують надширокий діапазон (октави) та високу лінійність, застосовуються в професійних вимірювальних приладах; YIG (Yttrium Iron Garnet, Ітрій-залізистий гранат) – це синтетичний феромагнітний матеріал з формулою $Y_3Fe_5O_{12}$, який має унікальні магнітні властивості, низькі втрати на НВЧ-частотах (GHz) і високу магнітооптичну активність, що робить його критично важливим для мікрохвильової техніки, лазерів, фільтрів та сенсорів;

4) за функціональним призначенням:

- синтезатори частоти – для формування стабільної сітки робочих каналів у радіозв'язку (трансивери, роутери) ;

- очищувачі джиттера (Jitter Cleaners) – використовуються для відновлення тактового сигналу з високим рівнем шумів, створюючи "чисту" копію;

- помножувачі частоти – для підвищення тактової частоти процесорів та пам'яті всередині комп'ютерних систем;

5) гібридні рішення (DDS + PLL) – окремий клас, де DDS виступає в ролі високоточного еталону для PLL, що поєднує переваги обох методів: роздільну здатність у мілігерци (від DDS) та гігагерцові діапазони (від PLL).

1.2. Промислові зразки генераторів сигналів.

Промисловістю випускається дуже широка номенклатура різноманітних за призначенням і частотним діапазоном генераторів. Крім того, останнім часом спостерігається інтеграція генераторів з осцилограмами чи іншими вимірювальними приладами.

Розглянемо промислові зразки генераторів сигналів різноманітного типу формування сигналів та різних за призначенням.

1. Генератори сигналів серії FY1100 представлені лінійкою виробів:

- FY1100-2M (з частотним діапазоном 2 МГц);

- FY1100-5M (з частотним діапазоном 5 МГц).

Це представники надзвичайно бюджетного класу пристроїв із вартістю порядку 3-4 тис. грн. (рис. 1.1).

Рисунок 1.1 – Генератор сигналів FY1100

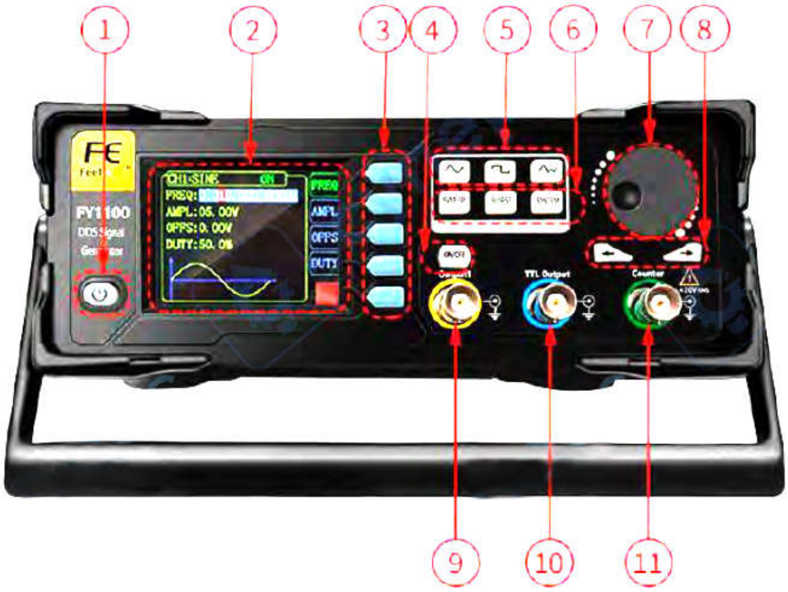


Рисунок 1.2 – Органи управляння генератора сигналів FY1100:
1 – кнопка живлення; 2 – LCD дисплей; 3 – функціональні кнопки; 4 – перемикач каналу; 5 – кнопки швидкого доступу до вибору форми сигналу; 6 – кнопки швидкого доступу до функцій; 7 – енкодер регулювання; 8 – кнопки напрямку; 9 – вихідний роз’єм CH1; 10 – роз’єм TTL; 11 – BNC вхідний роз’єм частотоміра/лічильника

Серія одноканальних генераторів сигналів FY1100 є портативним, економічним та багатофункціональним генератором сигналів, що поєднує функції

генератора сигналів, генератора імпульсів, лічильника та частотоміра. Прилад використовує інтегральну схему на базі великогабаритного програмованого вентильного масиву (FPGA) та високошвидкісний мікроконтролер (MCU), а внутрішня схема використовує високоточний активний кварцовий осцилятор як опору, забезпечуючи високу стабільність сигналу. Технологія монтажу поверхневого монтажу значно підвищує антиінтерференційні властивості та термін служби приладу. Прилад має одноканальний вихід сигналу DDS і рівня TTL, що дозволяє генерувати 13 видів сигналів різних форм, таких як синусоїда, примокутні імпульси, трикутний та пилкоподібний сигналі, та інші.

Генератор сигналів FY1100 має простий і зрозумілий інтерфейс з відображенням інформації на 2.4-inch TFT кольоровий РК-екран з роздільною здатністю 320×240, який може одночасно відображати параметри вихідного сигналу і підказувати поточні функції клавіш.

Даний виріб можна рекомендувати хіба що радіоаматорам та навчальним закладам, адже він має достатньо скромні технічні характеристики:

- частотний діапазон синусоїдального сигналу – 0…5 МГц;
- частотний діапазон сигналу прямокутної форми – 0…2 МГц;
- частотний діапазон трикутної форми – 0…3 МГц;
- діапазон частот цифрового сигналу TTL – 0…5 МГц;
- мінімальна роздільна здатність частоти – 10 мГц (0,01 Гц);
- точність частоти – $\pm 5\times 10^{-6}$;
- стабільність частоти – $\pm 1\times 10^{-6}$/3 години;
- вихідний імпеданс – 50 Ом+10% (типове значення);
- додатна позитивна хвиля амплітудної модуляції, хвиля частотної модуляції
- частота дискретизації – 150 MSa/s;
- вертикальна роздільна здатність – 12 біт;
- лінійність – ≥98% (0,01 Гц ~ 10 кГц);
- діапазон амплітуди (значення від піку до піку) – 10 $мB_{pp}$…15 B_{pp};
- роздільна здатність амплітуди – 10 мВ;
- стабільність амплітуди: ±0.5%/5 годин.

2. Генератор сигналів RIGOL DG1022Z. Даний генератор представляє собою достатньо бютжетну лінійку поширених пристроїв з посердніми технічними характеристиками.

Рисунок 1.3 – Генератор сигналів RIGOL DG1022Z

Генератор сигналів довільної форми DG1062Z – це багатофункціональний генератор, який поєднує багато застосувань в одному, включаючи генератор функцій, генератор сигналів довільної форми, генератор шуму, генератор імпульсів, генератор гармонік, аналоговий/цифровий модулятор і лічильник. Генератор можна застосовувати в галузі освіти, тестування, виробництві, R&D, тощо.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики генератора сигналів DG1062Z

Частотний діапазон	1 мкГц - 25 МГц
Кількість каналів	2
Час наростання/спаду	<10 нс
Мінумальна ширина імпульсу	16 нс
Частота дискретизації	200 МС/с
Роздільна здатність по вертикалі	14 біт
Частотна роздільна здатність	1 мкГц
Фазовий шум	< -125 дБн/Гц
Типи модуляції	AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK, PWM
Максимальна частота	25 МГц
Імпеданс	50 Ом
Дисплей	3.5, TFT, LCD 320 × 240

Технічні особливості:

- 2 повноцінно незалежних канали, кожен зі смугною 25 МГц (рис. 1.4);
- SiFi ("точність передачі сигналу") – іноваційна технололгія для 100% повторення необхідної форми сигналу (рис. 1.5);
- 8 Мегаточок/канал (станд.), 16 Мегаточок/канал (опц.) довільної довжини сигналу;
- вбудований 7-розрядний лічильник до 200 МГц;
- вбудовані попередньо налаштовані 160 осцилограм (рис. 1.6);
- інтуїтивно зрозуміле програмне забезпечення для редагування сигналів довільної форми;
- підтримка повної модуляції: AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK і PWM.

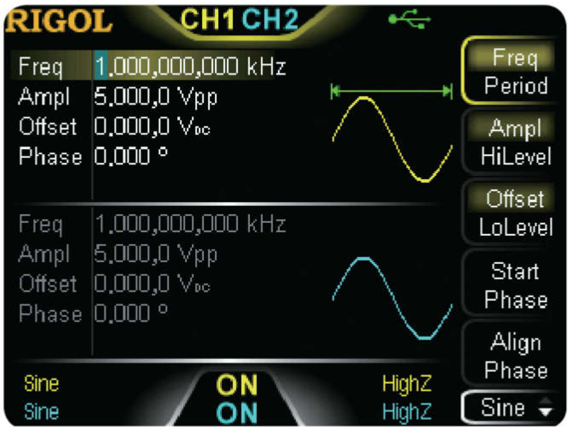


Рисунок 1.4 – Два повноцінно незалежних канали

Рисунок 1.5 – Іноваційна технололгія SiFi

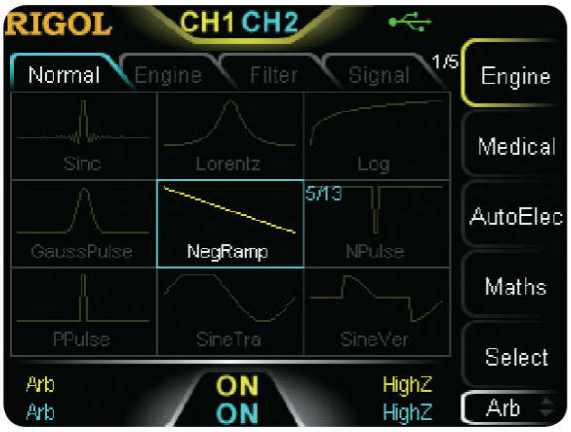


Рисунок 1.6 – Вбудовані попередньо налаштовані 160 осцилограм різної форми

Як бачимо, це достатньо посередні характеристики на сьогоднішній день. Смуга пропускання приладу всього 25 МГц.

Таблиця 1.2 – Класифікація радіочастотних діапазонів

№	Назва діапазону	Частота	Довжина хвилі, м	Застосування
4	Дуже низькі (ДНЧ/VLF)	3-30 кГц	100-10 км	Зв’язок з підводними човнами, навігація
5	Низькі (НЧ/LF)	30-300 кГц	10-1 км	Морська навігація, радіомовлення на ДХ
6	Середні (СЧ/MF)	300-3000 кГц	1 км-100 м	АМ радіомовлення на СХ, морський зв’язок
7	Високі (ВЧ/HF)	3-30 МГц	100-10 м	Короткохвильове мовлення (КХ), авіазв’язок
8	Дуже високі (ДВЧ/VHF)	30-300 МГц	10-1 м	FM-радіо, телебачення, рації
9	Ультрависокі (УВЧ/ULF)	300-3000 МГц	1 м-10 см	Мобільний зв’язок, Wi-Fi, Bleutootch, GPS
10	Надвисокі (НВЧ/SHF)	3-30 ГГц	10-1 см	Супутниковий зв’язок, радари
11	Надзвичайно високі (НЗВЧ/EHF)	30-300 ГГц	1 см-1 мм	Радіоастрономія, високошвидкісна передача

Цього цілком достатня для роботи з трактами НЧ, СЧ та частково ВЧ, аудіопідсилювачами, розробками в області атомобільної електроніки, тощо. Однак, характеристик даного приладу не вистачає для роботи в більш вищих діапазонах частот. Окрім того, вартість приладу складає від 60000 ло 77000 грн. у різних дистрибьюторів.

3. Високочастотний генератор сигналів RIGOL DSG815.

Високочастотний генератор сигналів, що забезпечує стандартні аналогові модуляції AM/FM/ЧМ з максимальною частотою 1,5 ГГц, а також свіпування по частоті і рівню.

Рисунок 1.7 – Високочастотний генератор сигналів RIGOL DSG815

Технічні особливості генератора:

- діапазон частот – 9 кГц …1,5 ГГц;
- роздільна здатність – 0,01 Гц;
- діапазон амплітуди вихідного сигналу – від -110 дБм до +13 дБм
- типове значення пожибки за амплітудою – 0,5 дБ;
- вихідна потужність від -110 дБм до +20 дБм;
- типове значення фазового шуму нижче -105 дБм/Гц при 20 кГц;
- частота опорного генератора – 10 МГц;
- температурна стабільність – в темп. діапазоні від 0 °C до 50 °C (< 2 ppm);
- функції аналогової модуляції – AM/FM/ЧМ (стандарт);

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	КПЕК.023029.01.02 ПЗ	Арк.

- інтерфейси дистанційного керування – USB/LAN (стандарт) та стандартний набір команд SCPI;

- дисплей – 3,5-дюймовий кольоровий РК, 320×240;

- вартість – 140000 грн.

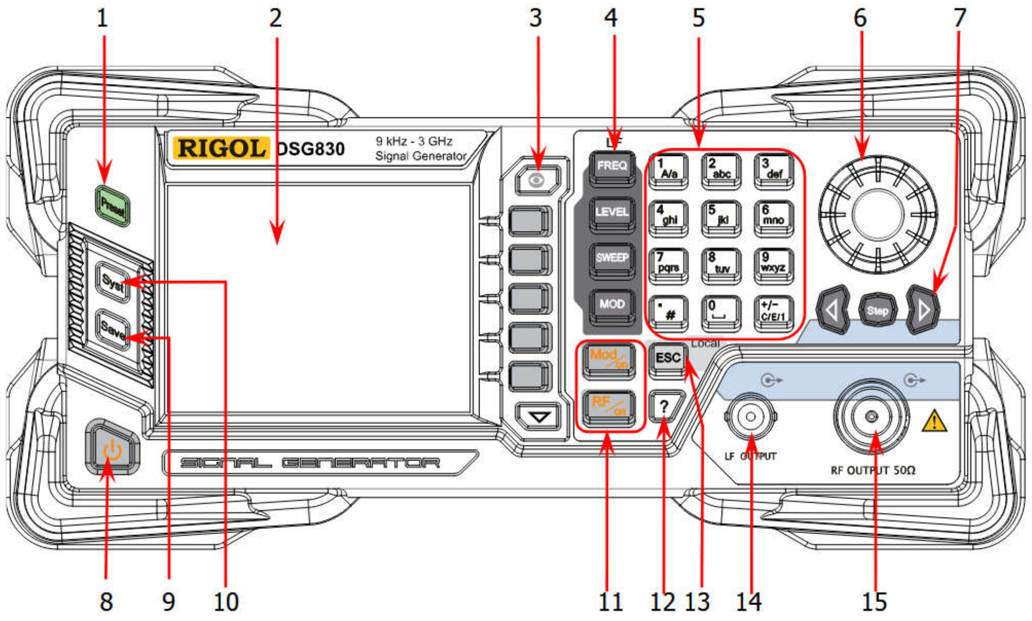


Рисунок 1.8 – Органи управляння генератора сигналів високочастотного генератора сигналів RIGOL DSG815:

1 – кнопка «Скидання»; 2 – LCD дисплей; 3 – кнопка «Меню»; 4 – функціональні кнопки; 5 – локальна клавіатура; 6 – енкодер регулювання; 7 – кнопки напрямку/кроків; 8 – вимикач живлення; 9 – кнопка збереження та повторного виклику; 10 – кнопка налаштувань системи; 11 – кнопка керування виходом; 12 – вбудована система довідки; 13 – кнопка «ESC»; 14 – вихідний роз'єм НЧ; 15 – вихідний роз'єм ВЧ

Генератор сигналів високочастотний Rigol DSG815 здатний формувати ВЧ та РЧ сигнали, що забезпечує широку сферу застосування при розробці та тестуванні електроніки, засобів зв'язку, аудіо- та відеотехніки, тощо. Завдяки можливості дистанційного керування генератором сигналів Rigol DSG815 за інтерфейсом LAN (LXI) його можна використовувати у вимірювальних лабораторіях будь-якої конфігурації.

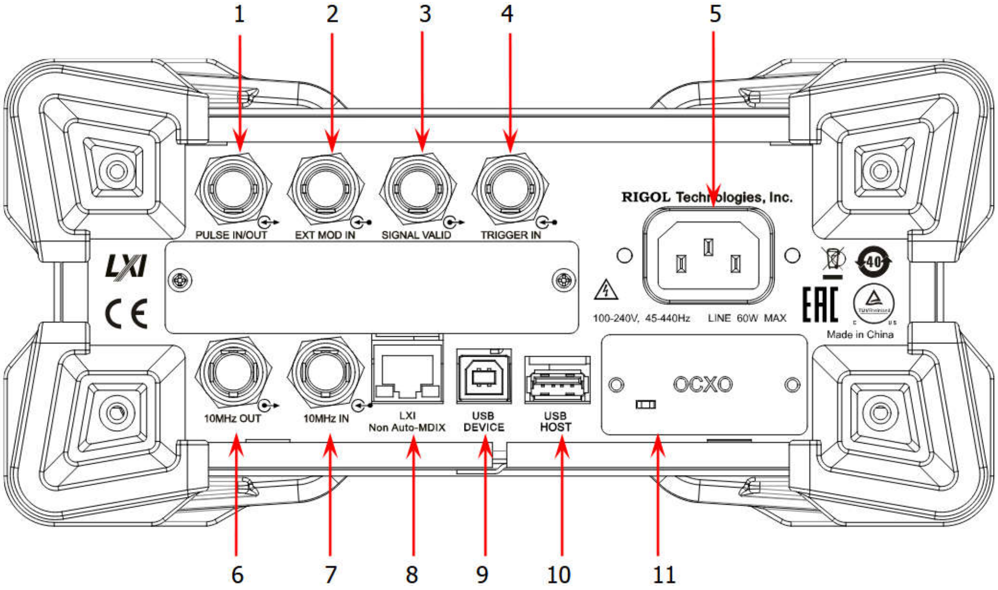


Рисунок 1.9 – Задня панель генератора сигналів RIGOL DSG815: 1 – роз'єм входу/виходу імпульсного сигналу; 2 – вхідний роз'єм зовнішньої модуляції; 3 – роз'єм вихідного сигналу синхронізації; 4 – вхідний роз'єм зовнішнього тригера; 5 – роз’єм живлення ~220 В; 6 – вихідний роз'єм опорного сигналу; 7 – вхідний роз'єм опорного сигналу; 8 – LAN роз’єм; 9 – USB типу B; 10 – USB типу A; 11 – джерело опорного сигналу (OCXO)

Генератор сигналів RIGOL DSG815 однозначно являється багатофункціональним професійним приладом, який можна обрати в якості пристрою-прототипу. Однак вартість 140000 грн., що на даний момент складає порядка 3500$ робить його майже недосяжним для більшості користувачів.

1.3. Сучасні багатофункціональні програмовані платформи.

Окремим різновидом генераторів сигналів останнім часом слід вважати Embedded (вбудований) розробки на готовій базі багатофункціональних платформ, таких, як Arduino, Raspberry Pi, STM32 та інші. На відміну від звичайних комп'ютерів, призначених для широкого спектру завдань, вбудовані системи

(embedded systems) зазвичай працюють у реальному часі та мають обмежені ресурси (пам'ять, процесорна потужність). Основні характеристики таких систем:

- керування залізом – програмування відбувається на рівні взаємодії з мікроконтролерами та мікропроцесорами (наприклад, Arduino чи Raspberry Pi);

- спеціалізація – система створюється під конкретний пристрій від мікрохвильовки до автопілота в автомобілі;

- стек технологій – найчастіше використовуються мови програмування C та C++, а також асемблер.

Завданням даного проекту є програмований генератор сигналів на базі STM32. Вибір саме цієї платформи обґрунтований наступними факторами:

- висока продуктивність – більшість контролерів STM32 працюють на частотах від 72 МГц до 400+ МГц, що в рази перевищує стандартні 16 МГц у Arduino Uno;

- 32-бітна архітектура – на відміну від 8-бітних AVR, STM32 може обробляти значно більші обсяги даних за один такт, що критично для складних математичних розрахунків;

- більший об’єм пам'яті – об'єм Flash-пам'яті та ОЗП (RAM) у STM32 зазвичай у десятки разів більший, що дозволяє запускати важкий код і зберігати великі масиви даних;

- розвинута периферія (АЦП та ЦАП) – більш точні 12-бітні аналогово-цифрові перетворювачі (проти 10-бітних у Arduino) та наявність апаратних цифро-аналогових перетворювачів

- інтерфейси – велика кількість портів UART, SPI, I^2C, а також підтримка CAN, USB та Ethernet у багатьох моделях;

- DMA (Direct Memory Access) – дозволяє передавати дані між периферією та пам'яттю без участі процесора, що суттєво розвантажує ядро;

- енергоефективність – наявність спеціальних ліній (наприклад, STM32L) з наднизьким споживанням енергії та гнучкими режимами сну;

- професійні інструменти відладки – підтримка інтерфейсів SWD/JTAG дозволяє проводити покрокове відлагодження коду в реальному часі, що майже неможливо на стандартних Arduino;

- програмне забезпечення – для STM32 існують як професійні середовища розробки, як-от STM32CubeIDE або Keil MDK, так і можливість програмування через звичну Arduino IDE або PlatformIO у Visual Studio Code.

Таблиця 1.1 – Порівняння платформ STM32F103 та Arduino Uno

Характеристика	Arduino Uno (Atmega 328P)	STM32F103C8T6 (Blue Pill)
Розрядність, Біт	8	32
Тактова частота, МГц	16	72
Flash пам’ять, кБіт	32	64/128
RAM (ОЗП), кБіт	2	20
Напруга живлення	5	3,3
АЦП, Біт	10	12
Апаратне відлагодження	–	SWD

Як бачимо, STM32 має явні переваги в технічному плані. Arduino Uno більше підходить для новачків завдяки простоті, тоді як STM32 – це професійний інструмент з вищою потужністю та гнучкістю. Продуктивність: STM32 значно швидша завдяки 32-бітній архітектурі та вищій частоті. Це дозволяє виконувати складні обчислення, обробку сигналів та керування двигунами в реальному часі. Стосовно енергоефективності, слід відмітити, що STM32 пропонує просунуті режими енергозбереження, що робить його кращим вибором для пристроїв з батарейним живленням (IoT). Периферійні можливості: STM32 має більше каналів ШІМ, таймерів та інтерфейсів зв'язку. Також він часто оснащений DMA (прямий доступ до пам'яті), що розвантажує процесор під час передачі даних.

Висновки до розділу 1

1. У 1 розділі приведена класифікація генераторів сигналів за формою вихідного сигналу, за частотним діапазоном, за принципом дії та схемотехнікою, за призначенням, за типом модуляції та інш. З проведеного аналізу слідує, що сучасні генератори використовуютьт два основних методи формування сигналів: класичний аналоговий ФАПЧ (ЧАПЧ) та більш сучасний цифровий – Direct Digital Synthesis (DDS).

2. Детально розглянуто типові промислові зразки генераторів сигналів – бютжетний варіант (FY1100), досить пристолйний за технічними характеритсиками "середнячок" (RIGOL DG1022Z) та професійний пристрій (RIGOL DSG815). Аналіз технічних параметрів та функціональних можливостей показує, що бютжентний варіант має досить скромні характеристики та більше підходить для радіоаматорів та навчальних закладів. Два інших генератора мають досить пристойний набір характеристик, однак неприйнятно велику вартість.

3. Зменшити вартість проєкту, забезпечуючи тим часом необхідний функціонал можна, використовуючи сучасні багатофункціональні програмовані платформи, наприклад Arduino Uno, STM32 або подібні. Порівняння їх технічних характеристик однозначно вказує на користь STM32.

2. ВИБІР І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ, РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ КОМПОНЕНТІВ

2.1. Загальна характеристика проєкту.

Сучасний розвиток електроніки, телекомунікаційних систем, засобів автоматизації та мікропроцесорної техніки потребує широкого використання вимірювального обладнання для налагодження, тестування та дослідження електронних пристроїв. Одним із найбільш затребуваних приладів у лабораторній та виробничій практиці є генератор сигналів, який використовується для формування тестових електричних сигналів різних типів та параметрів. Особливо, якщо це функціональний генератор, як електронний прилад, призначений для створення електричних коливань заданої форми, частоти та амплітуди [5]. Найчастіше він використовується для тестування, налаштування та ремонту радіоелектронної апаратури, перевірки каналів зв'язку та наукових досліджень [6]. Основні форми генерованих сигналів, створюваних таким приладом:

- синусоїдальний: базовий сигнал для перевірки аудіотехніки і частотних характеристик підсилювачів, частотних характеристик приладів окремих каскадів;

- прямокутний (меандр): використовується для тестування цифрових схем, логічних елементів, мікроконтролерів, лічильників, часових характеристик електронних пристроїв та тактування компонентів;

- трикутний: застосовується для перевірки лінійності підсилювачів, роботи інтеграторів і компараторів, системах керування та вимірювальній техніці та у розгортках осцилографів;

- пилкоподібний – застосовується для досліджень генераторів розгорток осцилографів, системах синхронізації, та для аналізу часових процесів;

- імпульсний – призначений для перевірка та налагодження імпульсних і цифрових схем, дослідження перехідних процесів в електронних колах, тестування швидкодії мікроконтролерів, логічних елементів і систем зв'язку, синхронізації роботи електронних пристроїв та моделювання реальних керуючих та інформаційних сигналів.

- шумовий сигнал (шум) – використовується для перевірки завадостійкості електронних систем, тестування фільтрів, аналізу спектральних характеристик, моделювання випадкових процесів та стрес-тестування систем.

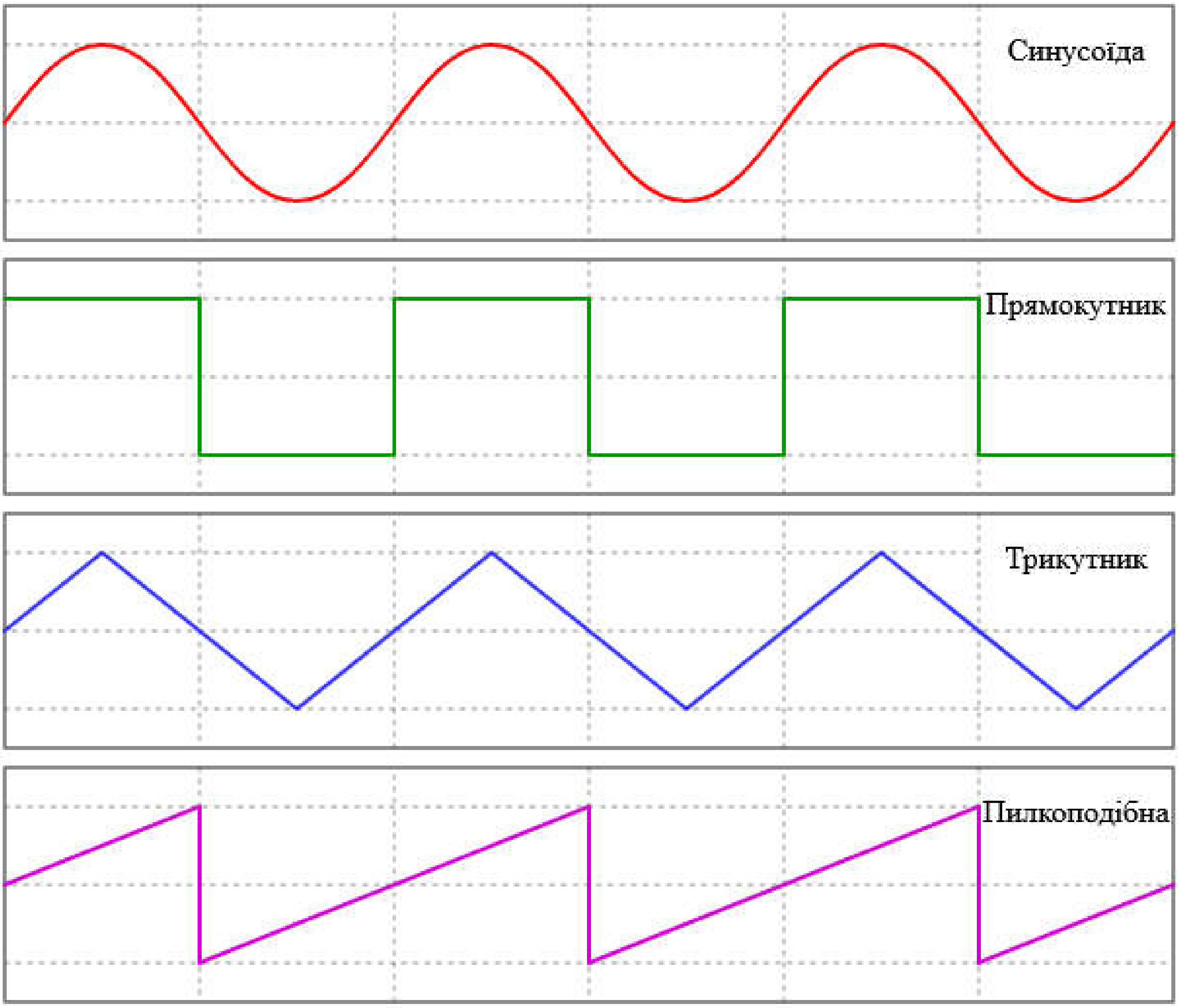


Рисунок 2.1 – Основні форми сигналів функціонального генератора

На ринку представлено значну кількість професійних генераторів сигналів, однак більшість із них мають високу вартість, що обмежує їх використання в освітніх установах, невеликих підприємствах та аматорських лабораторіях. Одночасно розвиток мікроконтролерних технологій і цифрових методів синтезу сигналів створює передумови для розроблення доступних пристроїв із характеристиками, близькими до професійного обладнання.

У даному проєкті розглядається створення програмованого генератора сигналів на базі мікроконтролера STM32 та DDS-синтезатора. Використання сучасної елементної бази дозволяє забезпечити високу точність формування сигналів, широкий частотний діапазон, зручне програмне керування та низьку собівартість виробу.

Таблиця 2.1 – Головні характеристики при виборі генератора

Характеристика	Параметри	Аналіз
Діапазон частот	Максимальна частота роботи (наприклад, від 1 мкГц до 10, 30 або 60 МГц)	Визначає можливість роботи у високочастотних діапазонах
Частота дискретизації	Кількість виборок в секунду (для цифрових генераторів DDS)	Впливає на чистоту і точність форми сигналу.
Роздільна здатність	Розрядність ЦАП (наприклад, 14 або 16 біт)	Чим вище, тим менше спотворень у вихідному сигналі.
Кількість каналів	1 або 2 незалежних канали	Два канали дозволяють подавати два різних сигнали одночасно.

У сфері електронних вимірювань використовуються генератори сигналів різного рівня складності. До найбільш відомих виробників належать Keysight Technologies, Rigol, Siglent, Tektronix та GW Instek. Вартість їхньої продукції залежить від функціональних можливостей та може становити від 150 до декількох тисяч доларів США.

Для навчальних лабораторій та невеликих підприємств придбання такого обладнання часто є економічно недоцільним. Особливо це актуально для закладів освіти, де необхідно обладнати значну кількість робочих місць.

Водночас сучасні DDS-модулі та мікроконтролери дозволяють реалізувати більшість функцій професійних генераторів при значно менших витратах. Завдяки цьому виникає можливість створення компактного програмованого генератора сигналів із достатніми характеристиками для більшості навчальних, дослідницьких та сервісних завдань.

Актуальність розробки полягає у:

- необхідності зниження вартості вимірювального обладнання;
- підвищенні доступності лабораторної техніки;
- можливості модернізації програмного забезпечення без зміни апаратної частини;
- використанні сучасних цифрових технологій синтезу сигналів;
- розвитку вітчизняних електронних розробок.

2.2. Порівняльний аналіз можливих варіантів реалізації.

Для створення генератора сигналів можуть використовуватись різні технічні рішення. Розглянемо 3 варіанти та проаналізуємо їх.

Варіант 1 – аналоговий генератор. Аналоговий функціональний генератор формує сигнали за допомогою безперервних фізичних процесів в електронних колах (заряд і розряд конденсатора, перемикання транзисторів) без використання цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) та мікропроцесорів. Структурна схема класичного аналогового генератора складається з п'яти основних блоків, з'єднаних послідовно:

1) джерело регульованого струму – задає швидкість заряду та розряду накопичувального конденсатора (визначає частоту);

2) інтегруючий конденсатор (інтегратор) – накопичує і віддає заряд, формуючи напругу, що лінійно змінюється;

3) схема порівняння (тригер Шмітта) – відстежує рівень напруги на конденсаторі та керує напрямом струму;

4) формувач синусоїди (нелінійний перетворювач) – «округлює» кути трикутного сигналу, перетворюючи його на синус;

5) вихідний підсилювач та атенюатор – регулюють фінальну амплітуду (гучність/потужність) сигналу та його постійне зміщення (offset).

Аналоговий синусоїдальний сигнал можна отримати різними шляхами:

- метод діодного формування (Piecewise Linear Shaping);

- метод диференціального підсилювача (Long-Tailed Pair);

- метод активних ФНЧ (фільтрів низьких частот).

В цілому, слід сказати, що формування синусоїдального сигналу з трикутного (або пилкоподібного) ґрунтується на математичному наближенні. Оскільки трикутна хвиля багата на вищі гармоніки, для перетворення її на синус використовують схеми "хвилеутворювачі" (wave shapers), які плавно зрізають (округлюють) піки. Основні методи наведено нижче.

1. Метод діодного формування (Piecewise Linear Shaping). Принцип роботи: від трикутника до синуса. На відміну від цифрових пристроїв, базовим («рідним») сигналом для аналогового генератора є трикутний, а не синусоїдальний. Весь процес формування синусоїди з трикутного імпульсу відбувається циклічно. Формування трикутника і меандру: джерело струму починає заряджати конденсатор строго постійним струмом. Напруга на ньому росте лінійно (рівна лінія вгору). Коли напруга досягає верхнього порогу, спрацьовує тригер Шмітта. Він миттєво перемикає джерело струму на розряд. Конденсатор починає лінійно розряджатися (рівна лінія донизу). При досягненні нижнього порогу тригер знову перемикає струм на заряд.

Результат: на конденсаторі виходить трикутний сигнал. На виході самого тригера Шмітта у моменти перемикання формується прямокутний сигнал (меандр).

Отримання синусоїди: трикутний сигнал подається на спеціальну діодно-резистивну сітку (нелінійний формувач). Діоди відкриваються по черзі при зростанні напруги, плавно занижуючи («зрізаючи») вершини трикутника за математичним законом синуса.

Результат: на виході виходить плавна синусоїда.

Це класичний підхід, де використовується коло резисторів і діодів. Коли амплітуда трикутного сигналу досягає певного порогу (напруги відкриття), черговий діод починає проводити струм. Це поступово змінює (зменшує) коефіцієнт підсилення схеми, згладжуючи лінійні схили трикутника у плавні синусоїдальні сегменти (рис. 2.2).

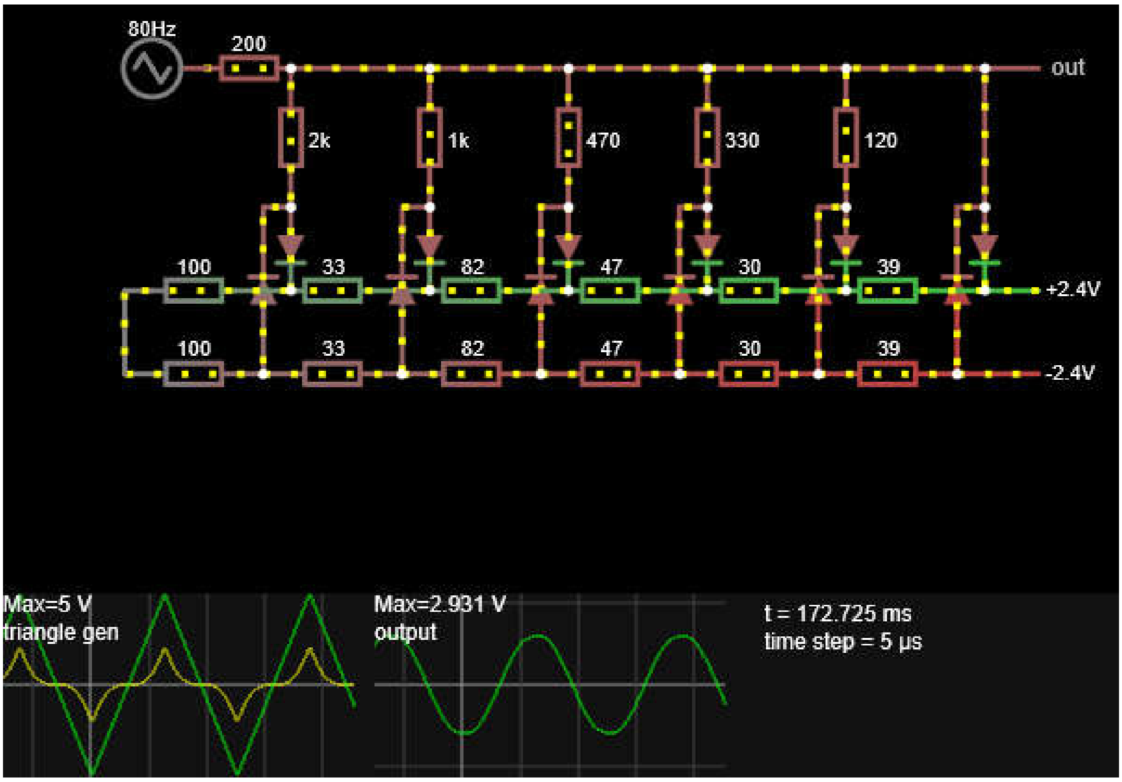


Рисунок 2.2 – Симуляція формування синусоїдального сигналу з трикутного за допомогою резистивно-діодної матриці

Метод диференціального підсилювача (Long-Tailed Pair). Базується на нелінійній (логарифмічній) залежності між напругою база-емітер і колекторним струмом у біполярних транзисторів. Схема на парі диференціальних транзисторів має *tanh*-характеристику, яка ідеально перетворює трикутний сигнал низької амплітуди на синусоїду з дуже низьким рівнем гармонійних спотворень (THD)

Метод активних ФНЧ (фільтрів низьких частот). Оскільки спектр трикутного сигналу складається з основної частоти f_0 та непарних гармонік ($3f_0$, $5f_0$, $7f_0$, тощо), для виділення чистого синуса можна застосувати фільтр. Фільтр низьких частот

(ФНЧ) пригнічує вищі гармоніки, залишаючи лише основний тон у вигляді гарної синусоїди. Головний недолік – фільтр потрібно налаштовувати або перемикати при зміні частоти генератора.

Переваги аналогового методу формування сигналів:

- проста схема;
- невисока вартість;
- відсутність ступінчастості сигналу (немає квантування по амплітуді);
- відсутність цифрового шуму і спотворень округлення;
- миттєва реакція на поворот ручки частоти.

Недоліки:

- низька точність (особливо за шкалою грубого потенціометра);
- нестабільність частоти;
- складність перелаштування параметрів;
- складно задати ультранизькі частоти.

Варіант 2 – генератор на ПЛІС. Принцип роботи генератора на ПЛІС (FPGA) залежить від його типу: цифровий генератор періодичних сигналів функціонує за принципом прямого цифрового синтезу (DDS), а тактовий імпульсний генератор – за принципом кільцевого автогенератора (Ring Oscillator) або апаратної схеми автопідлаштування частоти (PLL/MMCM).

Переваги:

- висока швидкодія;
- широкі можливості обробки.

Недоліки:

- висока вартість;
- складність розробки.

Варіант 3 – Генератор на STM32 та DDS. Генератор на STM32 і DDS – це пристрій цифрового синтезу частоти, який створює періодичні аналогові сигнали (синусоїду, трикутник, прямокутник) шляхом послідовного зчитування цифрових значень амплітуди з пам'яті та їх перетворення за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). [7]

Існує два підходи до створення таких генераторів: програманий DDS (де всі обчислення виконує сам мікроконтролер STM32) та апаратний DDS (де STM32 лише керує зовнішнім спеціалізованим чіпом, наприклад, AD9833 або AD9850).

Принцип роботи DDS (Direct Digital Synthesis). В основі технології прямого цифрового синтезу лежать три головні компоненти: акумулятор фази, таблиця форми сигналу (LUT) та ЦАП.

1. Генерація опорної частоти: система працює за тактовими імпульсами фіксованої частоти f_{clk}, (clock).

2. Акумуляція фази: на кожному тактовому імпульсі до спеціального регістра (акумулятора фази розрядністю N біт) додається фіксована величина – код частоти $\Delta\theta$ (Phase Tuning Word).

3. Формування кроку: повна ємність акумулятора (2^N) відповідає фазі сигналу у 360° (або 2π радіан). Рівняння вихідної частоти визначається як:

$$f_{out} = \frac{\Delta\theta \cdot f_{CLK}}{2^N} \tag{2.1}$$

4. Пошук значення в таблиці (LUT): старші біти акумулятора фази використовуються як адреса для таблиці в пам'яті (Look-Up Table), де зберігаються цифрові значення амплітуди (наприклад, масив точок синусоїди).

5. Аналогове перетворення: Цифрове значення з таблиці передається на ЦАП, який видає відповідну ступінчасту напругу. Фільтр низьких частот (ФНЧ) на виході згладжує сигнал, видаючи чисту аналогову

Особливості реалізації на STM32. Мікроконтролери сімейства STM32 є ідеальними для створення DDS завдяки високій тактовій частоті, розвиненій периферії та гнучкій архітектурі.

1. Програмна реалізація (генерація силами STM32). Використовуються внутрішні апаратні модулі мікроконтролера, що дозволяє відмовитися від зовнішніх мікросхем синтезаторів:

- таймери (TIM): Задають сувору частоту дискретизації \(f_{clk}\) без використання циклів затримки процесора;

- контролер DMA (Прямий доступ до пам'яті): Головна фішка STM32. DMA автоматично пересилає дані з таблиці масиву (в RAM або Flash) до регістру ЦАП без залучення ядра процесора. Це звільняє обчислювальну потужність для інтерфейсу, дисплея або кнопок;

- вбудований DAC (ЦАП): Більшість моделей (наприклад, STM32F4, STM32G4, STM32H7) мають швидкі 12-бітні ЦАП, які можуть працювати на частотах у кілька мегагерц. Для моделей без ЦАП (як STM32F103) використовують зовнішню матрицю резисторів R-2R або ШІМ (PWM) з ФНЧ.

2. Апаратна реалізація (STM32 + зовнішній чіп DDS). STM32 виступає виключно як «мозок» керування для мікросхем на кшталт AD9833, AD9850 або AD9910:

- інтерфейс зв'язку: STM32 розраховує необхідний код частоти $\Delta\theta$ і передає його в чіп DDS (наприклад через високошвидкісну шину SPI);

- розподіл задач: зовнішній чіп бере на себе всю важку роботу з тактування на частотах до сотень мегагерц, а STM32 відповідає за візуалізацію інформиації, керування (кнопки, ручки, енкодери), меню та логіку роботи.

Таблиця 2.2 – Переваги та недоліки DDS на STM32

Характеристика	Програмний DDS (тільки STM32)	Апаратний DDS (STM32 + ADxxxx)
Максимальна частота	Обмежена (~100 кГц – 5 МГц залежно від чіпа)	Дуже висока (від 0 до 1+ ГГц)
Форма сигналу	Будь-яка (довільна форма, задана масивом)	Фіксована (зазвичай синус, трикутник, меандр)
Вартість	Мінімальна (потрібен лише мікроконтролер)	Вища (через вартість чіп DDS та його обв'язку)
Крок перелаштування	Залежить від ємності масиву та таймера	Субгерцовий (дуже точний, до часток Гц)
Складність схеми	Низька	Середня (вимоги до ВЧ розведення плати)

Підведемо підсумок переваг і недоліків в цілому підходу STM32+ DDS.

Переваги:

- висока точність;
- невисока вартість;
- гнучкість програмування;
- простота модернізації.

Недоліки:

- наявність цифрового шуму у спектрі вихідного сигналу.

Головні технічні обмеження:

- ефект джиттеру та аліасингу: відповідно до теореми Котельникова (Найквіста), частота дискретизації має бути мінімум удвічі вищою за максимальну вихідну частоту. На практиці для якісного синуса частота дискретизації має перевищувати вихідну в 5-10 разів;

- шуми квантування: 12-бітний вбудований ЦАП STM32 обмежує динамічний діапазон за амплітудою. Для прецизійних приладів використовують зовнішні 14- або 16-бітні ЦАП;

- необхідність ФНЧ: на виході ЦАП завжди присутні сходинки. Для отримання чистого аналогового сигналу обов'язково потрібен активний або пасивний фільтр (наприклад, фільтр Баттерворта або Еліптичний фільтр).

Отже, порівняння показує, що третій варіант є найбільш доцільним з технічної точки зору.

2.3. Економічний розрахунок витрат на розробку.

Економічна оцінка являється немаловажною характеристикою будь-якої розробки. Це дозволяє оцінити ефективність спроєктованого пристрою в цілому, а особливо його економічну сторону. Особливо у порівнянні з пристроєм-прототипом. Немаловажним є перевершити пристрій-прототип у технічних характеристиках, однак не менш важливим є порівняння їх економічних показників. Адже у випадку, якщо спроектований пристрій буде дорожчим розробка втратить смисл.

Це не зовсім економічний розділ, в прямому розумінні, а більш ескізний економічний розрахунок, який дає наближений результат. Однак цього буде достатньо для оцінки собівартості проєкту в першому наближенні.

Таблиця 2.3 – Перелік основних компонентів.

Найменування	Кількість	Ціна, грн
Мікроконтролер STM32	1	350
DDS-модуль AD9834	1	450
OLED/LCD дисплей	1	250
Енкодер керування	1	80
Друкована плата	1	250
Пасивні елементи	комплект	150
Роз'єми та кріплення	комплект	120
Корпус	1	300
Блок живлення	1	250

1. Загальна вартість матеріалів:

$$B_м=350+450+250+80+250+150+120+300+250=2200 \text{ грн.} \quad (2.2)$$

2. Витрати на оплату праці. Припустимо, що розробка виконується одним інженером. Тривалість розробки:

аналіз вимог – 20 годин;

проєктування схеми – 35 годин;

розробка друкованої плати – 25 годин;

програмування – 60 годин;

налагодження – 40 годин;

тестування – 20 годин.

Отже, загальна трудомісткість:

$$T=20+35+25+60+40+20=200 \text{ годин.} \quad (2.3)$$

Середня погодинна ставка інженера:

$$C=250 \text{ грн./год.} \quad (2.4)$$

Основна заробітна плата:

$$З_{осн}=200×250=50\ 000 \text{ грн.} \quad (2.5)$$

Додаткова заробітна плата (15%):

$$З_{дод}=50\ 000×0{,}15=7\ 500 \text{ грн.} \quad (2.6)$$

Загальний фонд заробітної плати:

$$З_{ф}=57500 \text{ грн.} \quad (2.7)$$

3. Відрахування на соціальні заходи. Єдиний соціальний внесок:

ЄСВ = 22 %

ЄСВ=57500×0,22=12650 грн. (2.8)

4. Накладні витрати. До накладних витрат належать:

- електроенергія;
- амортизація обладнання;
- оренда приміщення;
- інтернет та зв'язок;
- канцелярські витрати.

Приймемо накладні витрати на рівні 50 % від основної заробітної плати:

$$Н_{В}=50000×0{,}5=25000 \text{ грн.} \quad (2.9)$$

5. Повна собівартість розробки. Вона включає:

- матеріали – 2200 грн.;
- заробітна плата – 57500 грн.;
- ЄСВ – 12650 грн.;
- накладні витрати – 25000 грн.

Отже:

$$C=2200+57500+12650+25000 \qquad (2.10)$$

$$C=97350 \text{ грн.}$$

Таким чином, повна собівартість розробки дослідного зразка становить приблизно 97 тис. грн.

6. Економічна ефективність проєкту. Порівняємо розроблений пристрій із комерційними аналогами. Пристрій прототип має вартість 140000 грн. Економія при використанні власної розробки становить:

$$E=14000-97000=43000 \text{ грн.} \qquad (2.11)$$

на одному виробі.

При виготовленні дрібносерійної партії зі 100 пристроїв:

$$E_{заг.}=43000\times100=4300000 \text{ грн.} \qquad (2.12)$$

Отже, проєкт має достатньо потужний позитивний економічний ефект.

7. Оцінка конкурентоспроможності. Основними факторами конкурентоспроможності є:

- нижча ціна;
- достатня функціональність;
- можливість модернізації;
- простота ремонту;

- відкритість програмного забезпечення.

Для навчальних закладів, радіотехнічних лабораторій та радіоаматорів розроблений пристрій є більш економічно вигідним порівняно з імпортними аналогами.

8. Перспективи комерціалізації. Подальший розвиток проєкту може передбачати:

- додавання кольорового дисплея;
- USB та Bluetooth-інтерфейсів;
- генерацію довільних форм сигналів;
- підтримку мобільного за стосунку.

Випуск навіть невеликих серій таких пристроїв може бути економічно доцільним для освітніх установ, сервісних центрів та електронних лабораторій. А в межах країни економічний ефект є колосальним, адже навіть при дрібносерійному виробництві еконовичний ефект складе більше 4 міліонів гривень.

2.4. Розробка структурної схими програмованого генератора сигналів на базі STM32.

Структурна схема програмованого генератора сигналів на базі STM32 представлена на (рис. 2.3):

- платформа розробника (STM32);
- органи керування;
- LCD дисплей;
- DDS генератор;
- тактовий генератор;
- фільтр нижніх частот (ФНЧ);
- підсилювач-коректор;
- атенюатор;
- блок живлення.

Розглянемо коротенько кожну структурну (функціональну) складову.

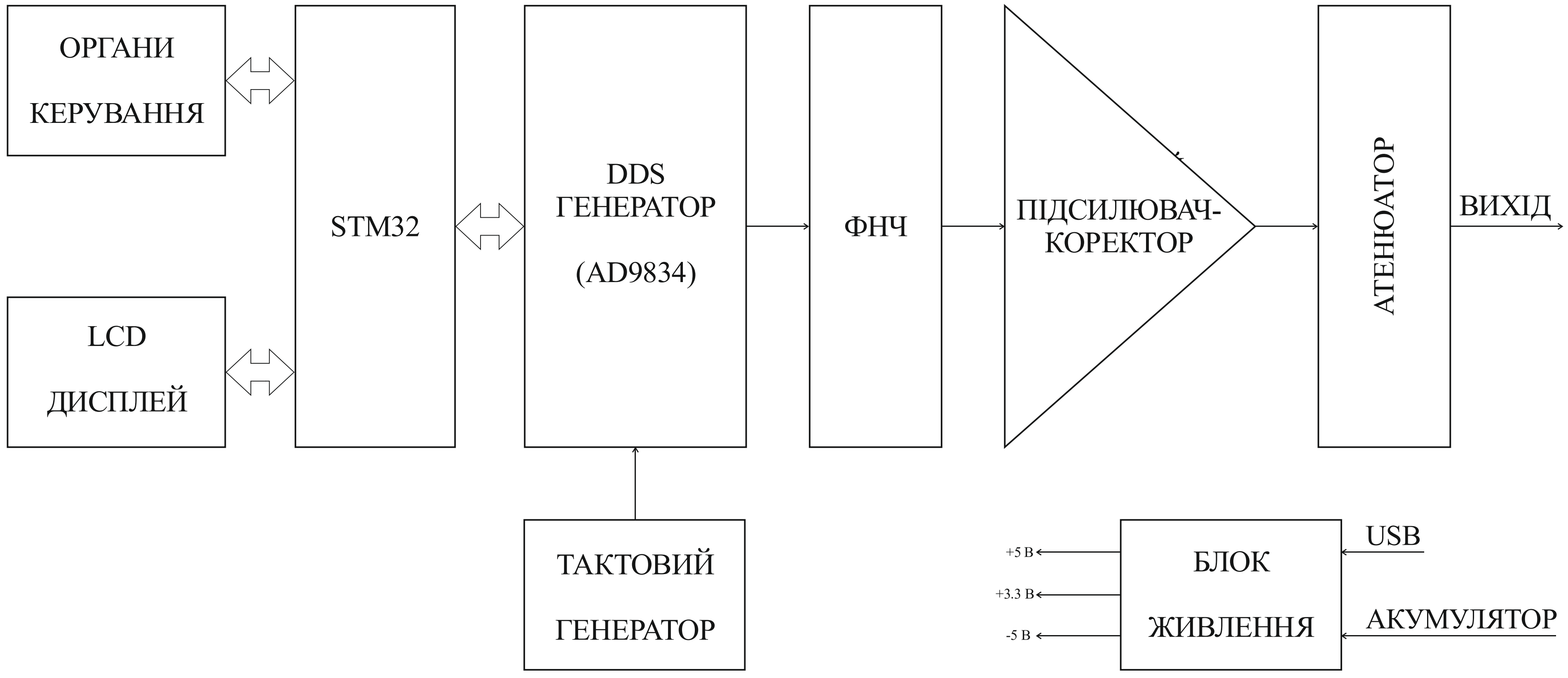


Рисунок 2.3 –Схема електрична структурна програмованого генератора сигналів на базі STM32

Платформа розробника STM32 є основою проєкту, виконуючи задачі загального мікроконтролера з оригінальним програмним забезпеченням. Вона здійснює опції керування DDS синтезатором та пристроєм в цілому за допомогою органів керування, а також виведення графічної інформації на дисплей. Мікроконтролер STM32 у загальній структурі DDS-генератора (прямого цифрового синтезу) виконує роль головного центру управління (мозку системи). Сам по собі DDS-метод вимагає надвисоких перелаштувань частоти, тому генерацією сигналу займається спеціалізована мікросхема, якою необхідно керувати.

LCD дисплей та його вибір також немаловажний елемент розробки. Він є обов’язковим атрибутом будь-якого приладу, адже якимось чином необхідно візуалізувати результати роботи генератора: поточну частоту, форму сигналу, розмах сигналу, часові інтервали сигналів та інше.

DDS генератор і є по суті тим пристроєм, який необхідно спроєктувати. Саме він генерує випробувальні сигнали. Однак в силу своєї специфіки він потребує зовнішнього керування. Цю функцію виконує мікроконтролер STM32. Крім того, специфіка технології прямого цифрового синтезу, окрім зовнішнього керування, вимагає наявності ще двох складових: тактового генератора і фільтр нижніх частот (ФНЧ).

Тактовий генератор є серцем DDS-системи та визначає всі ключові характеристики вихідного сигналу. Прямий цифровий синтез (DDS) будує вихідний сигнал крок за кроком зчитуючи цифрові значення з пам'яті з кожним тактовим імпульсом. Якість, частота та стабільність цього «фундаменту» безпосередньо задають межі можливостей всього пристрою.

Фільтр нижніх частот забезпечує згладження ступінчатої структури сигналу на виході DDS, забезпечуючи покращення форми і спектральної чистоти вихідних сигналів.

Підсилювач-коректор відіграє роль основного вузла підвищення енергетики сигналу, буферизації та корекції нуля вихідних сигналів. При роботі з генератором сигналів часто необхідно мати як уніполярні сигнали, так і двополярні. Ці функції і

покладені на підсилювач-коректор. Реалізація даного вузла буде здійснена в 3 розділі, але вже і так зрозуміло, що це має бути інтегральний операційний підсилювач, досить широкосмуговий і високочастотний (наприклад для обробки відеосигналів).

Наступна складова генератора – атенюатор, роль якого протилежна до підсилювача. Він має забезпечувати затухання сигналів, причому з прецизійною точністю і на визначену користувачем величину. Це можна зробити різними шляхами, але найбільш популярним і дешевим методом є – резистивний подільник. Потрібно тільки точно розрахувати відповідні коефіцієнти ділення.

Блок живлення являється обов'язковим атрибутом будь-якого пристрою. Знову ж таки, вони бувають надзвичайно різними, побудованими за класичними принципами чи у імпульсному виконанні, мати стабілізатори, опорні джерела, тощо. Однак в нашому випадку було вирішено використати два варіанта живлення: від USB порту, як найбільш популярного та від автономного джерела – акумуляторів. Це дозволяє використовувати пристрій в польових умовах, що сьогодні надзвичайно актуально. Тобто можна живитися від павербанка, телефона, телевізора, ноутбука, та інш. Наступною особливістю блока живлення є те, що він має бути двополярним. Однак при обраному варіанті живлення від USB або акумулятора ми маємо тільки одно полярну напругу. Тому потрібно розробити відповідне схемо технічне рішення, яке забезпечуватиме формування двополярної напруги живлення з однополярної +5 В.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. В розділі приведена загальна характеристика проєкту, визначено метод формування сигналів, їх форму та номенклатуру. Доведено, що найбільш оптимальними характеристиками для реалізації поставлених задач є поєднання платформи STM32 і DDS синтезатора.

2. Проведене техніко-економічне обґрунтування, яке показало доцільність розробки програмованого генератора сигналів на базі STM32 і DDS-синтезатора. Використання цифрового синтезу сигналів дозволяє отримати високі технічні характеристики при відносно невеликих витратах на реалізацію. Собівартість дослідного зразка є значно нижчою за вартість комерційних аналогів, а функціональні можливості повністю задовольняють потреби навчальних лабораторій, сервісних центрів та невеликих дослідницьких підрозділів. Економічні розрахунки підтверджують ефективність проєкту та перспективність його подальшого впровадження. Розроблений пристрій може розглядатися як конкурентоспроможне рішення в сегменті доступного вимірювального обладнання, а також як платформа для подальших науково-технічних досліджень і модернізації.

3. Згідно технічного завдання та вимог до кваліфікаційних проєктів, розроблено схему електричну структурну. Пристрій містить наступні функціональні складові:

- платформа розробника (STM32);
- органи керування;
- LCD дисплей;
- DDS генератор;
- тактовий генератор;
- фільтр нижніх частот (ФНЧ);
- підсилювач-коректор;
- атенюатор;
- блок живлення.

3. РОЗРАХУНОК СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ

3.1. Модуль STM32 з периферійними пристроями.

Модулі STM32 (рис. 3.1, 3.2) є універсальними платформами для розробки різноманітних пристроїв. В даному випадку – програмованого генератора сигналів. Подібні рішення є надзвичайно корисними, адже ми маємо готову плату з мікроконтролером, периферією, необхідним набором портів I/O та можливістю варіативного наповнення програмного забезпечення.

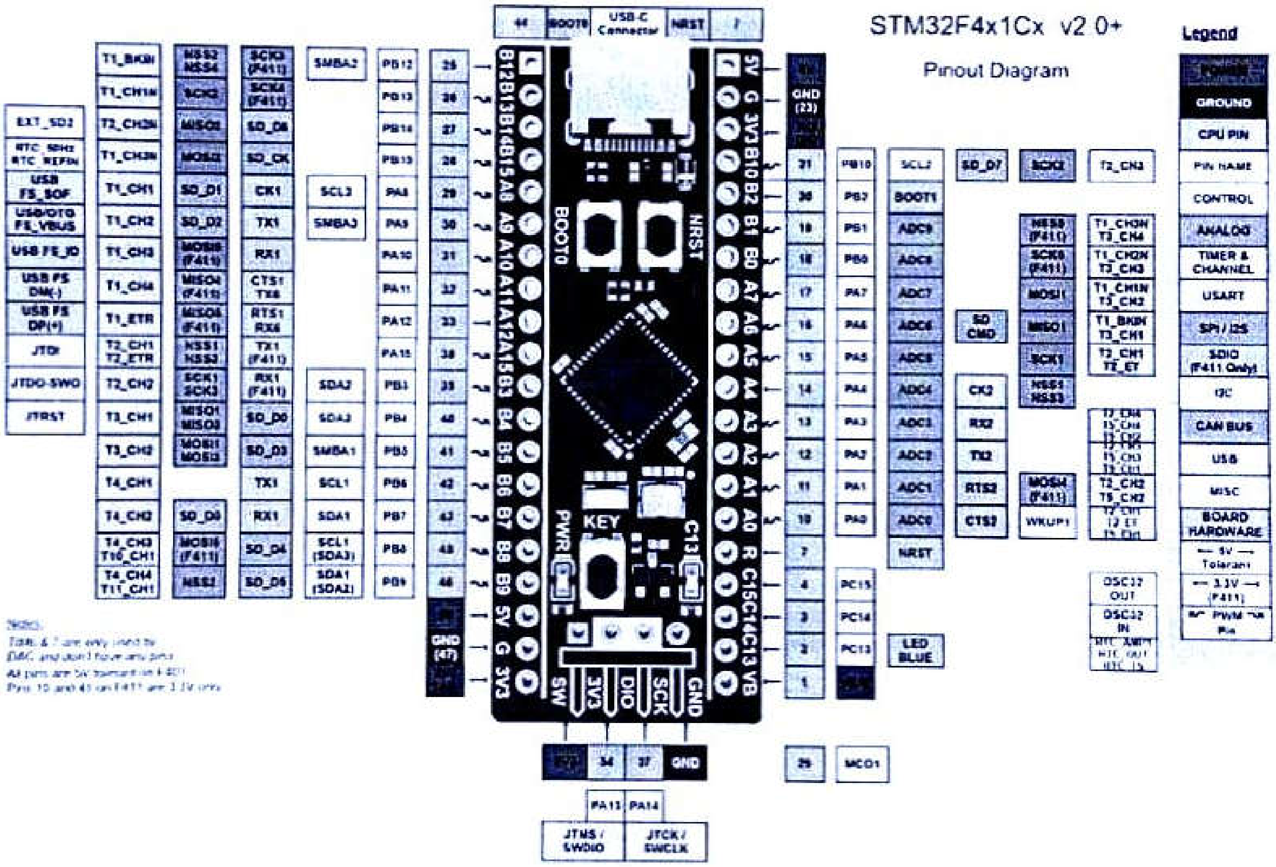


Рисунок 3.1 – Модуль STM32

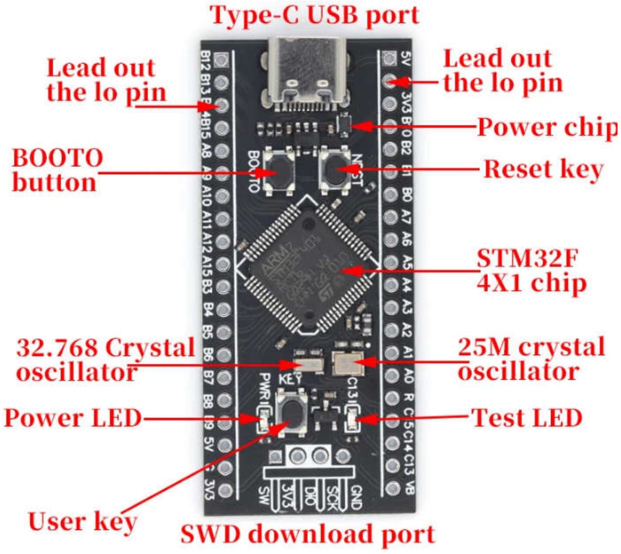


Рисунок 3.2 – Склад модуль STM32

Як бачимо з рис. 3.2, модуль містить:

- зліва і справа виводи, до яких можна під’єднуватися і доповнювати платформу власними зовнішніми модулями та вузлами, згідно потреб;
- кнопка BOOT (або BOOTO), яка призначена для переведення пристрою в спеціальний режим програмування (режим завантажувача), щоб можна було оновити або завантажити нову прошивку;
- кнопка Reset, зрозуміло для скидання;
- безпосередньо сам чіп STM32F401RCT6;
- кварцовий резонатор 32,768 кГц (часовий);
- кварцовий резонатор 25 МГц (тактовий);
- світлова індикація (живлення і тест);
- кнопка User Key, яка призначена для тестування та взаємодії з програмою.
- роз’єм SWD (Serial Wire Debug) — це компактний двопровідний інтерфейс компанії ARM, призначений для програмування та відладки мікроконтролерів (переможно з ядрами Cortex-M, такими як STM32); Він розроблений як енергоефективна альтернатива класичному інтерфейсу JTAG і дозволяє повністю контролювати чіп, забезпечуючи мінімум виводів.

Основні виводи (піни):

- SWDIO (Serial Wire Data Input/Output) – двонаправлена лінія передачі даних.SWCLK (Serial Wire Clock), лінія тактового сигналу, який генерується програматором (майстром);

- GND – загальна земля;

- V_{CC} – живлення (програматор використовує його для визначення логічного рівня сигналів цільової плати);

- RESET / NRST – апаратне скидання мікроконтроллера (корисно, якщо прошивка заблокувала виводи SWD);

- SWO / TRACESWO – вивід для асинхронного виведення трасування (наприклад, для швидкого логування printf без використання UART).

Принцип роботи протоколу – пакетна передача: обмін відбувається пакетами даних, майстер відправляє запит, пристрій повертає квитанцію (ACK), потім передаються або приймаються 32-бітові дані, суміщені з виводами JTAG (TMS та TCK); перемикання режиму відбувається програмно за допомогою спеціальної стартової послідовності сигналів.

Модуль STM32 побудований на основі мікросхеми STM32F401RCT6 (рис. 3.3), реалізація якої може бути у різноманітних корпусах.

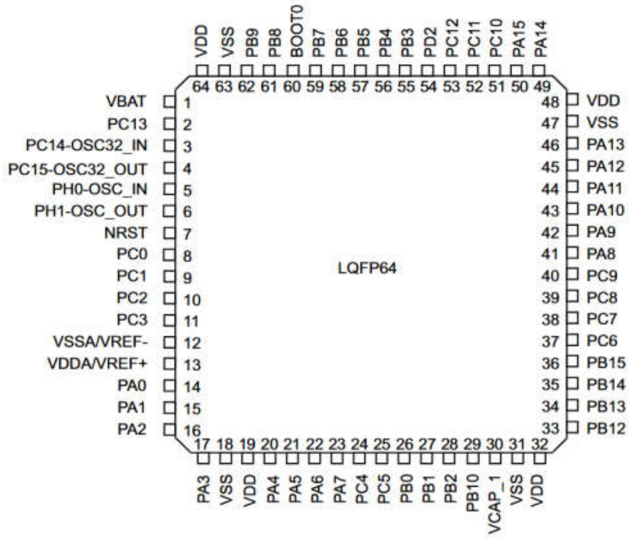


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд та призначення виводів STM32F401RCT6

STM32F401RCT6 материнська плата, розробки MicroPython, покращена версія популярної Blue Pill, яка базується на F103. Ця новіша модель має потужніший процесор ARM на базі Core-M4F. Завантажувач DFU підтримується процесорами F401 та F411. Ядро Cortex®-M4 містить блок обчислень з плаваючою комою одинарної точності (FPU), який підтримує всі інструкції та типи даних ARM одинарної точності. Воно також містить повний набір інструкцій DSP та блок захисту пам'яті (MPU) (до 256 Кбайт флеш-пам'яті, до 64 КБ SRAM) для підвищення безпеки додатків, високошвидкісну вбудовану пам'ять, а також широкий спектр покращених пристроїв введення/виведення та периферії, підключених до двох шин APB, двох шин AHB та 32-бітної матриці шин з кількома AHB.

Схема електрична принципова програмованого генератора сигналів на базі STM32 представлена на рис. 3.4.

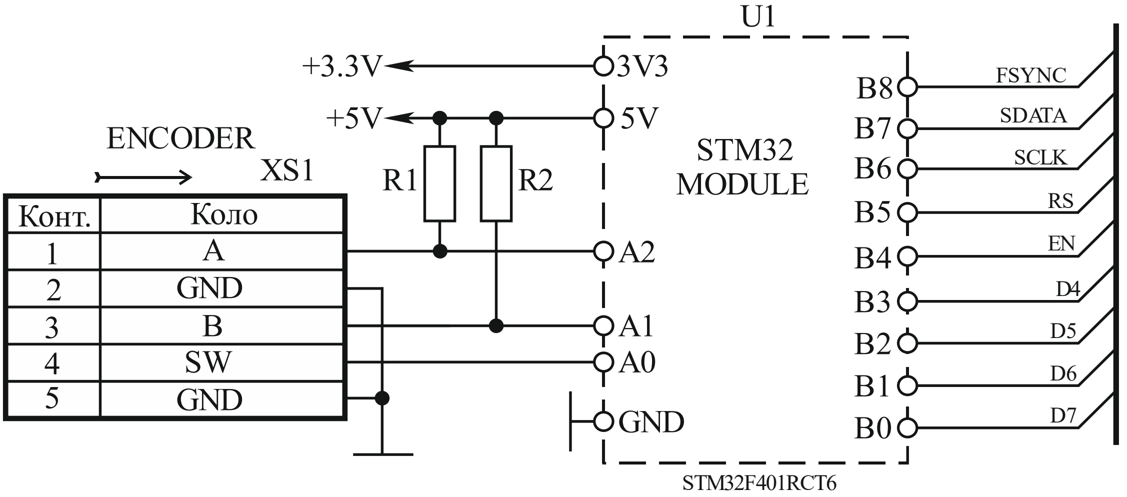


Рисунок 3.4 – Схема електрична принципова модуля STM32

Модуль по суті самодостатній, не потребує ніяких дій, окрім завантаження оригінального програмного забезпечення. Воно має включати:

- роботу з енкодером;
- виведення інформації на LED дисплей;
- керування DDS синтезатором.

Виберемо енкодер типу EC11E – звичайний механічний інкрементальний енкодер з каналами A/B та кнопкою (рис. 3.5). На STM32F401RCT6 найкраще використати апаратний режим Timer Encoder Mode**.** Таймер STM32 сам декодує квадратурні сигнали без навантаження на CPU.

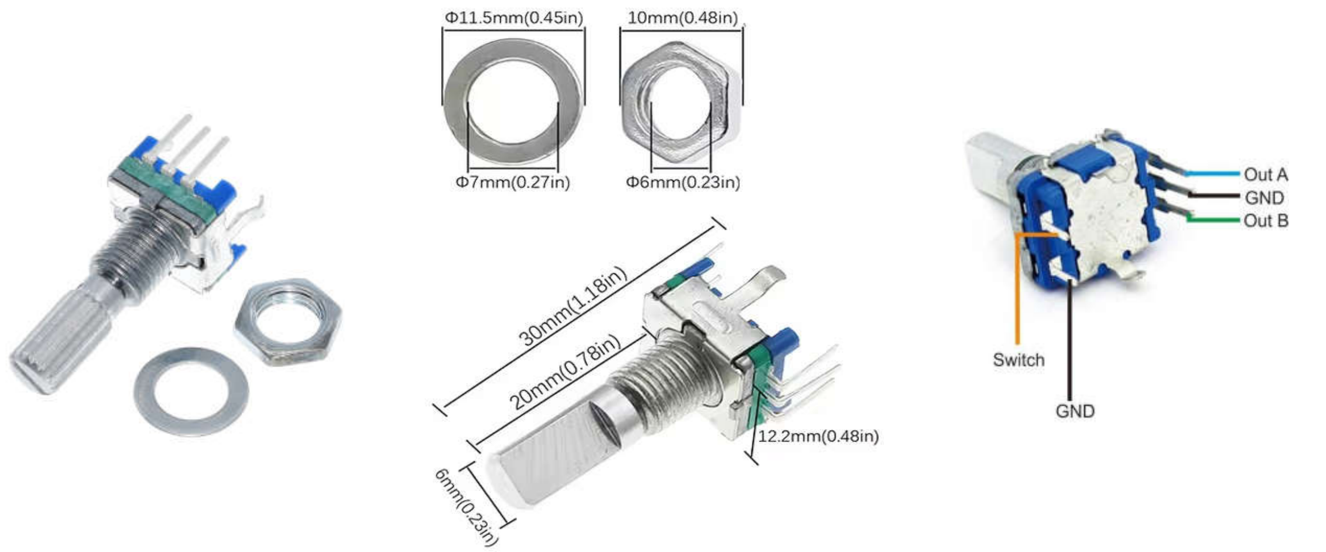


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд та призначення виводів енкодера з кнопкою EC11E

Інкрементний енкодер або датчик кута повороту EC11 – це електромеханічний пристрій, який призначений для перетворення кутового положення валу або осі в електричні сигнали. Інкрементний енкодер при обертанні формує імпульси, кількість яких пропорційна куту повороту. Підрахунок числа цих імпульсів дає величину кута повороту валу енкодера щодо його початкового положення. Цей тип енкодерів не формує вихідні імпульси, коли його вал перебуває у спокої. Особливістю даного енкодера є наявність додаткової кнопки (комутатора), який можна використати в якості додаткового органу керування. Натисканням кнопки і обертанням ручки енкодера можна організувати повноцінне керування всім приладом: енкодер – для пошуку, руху по МЕНЮ, а кнопка – для фіксації обраної функції.

Для механічного енкодера бажано увімкнути внутрішні підтягуючі резистори (в нашому випадку R1 і R2) та цифровий фільтр таймера через брязкіт контактів.

CubeMX

Налаштування:

TIM3

- Mode → Encoder Mode
- Encoder Mode = TI1 and TI2
- Prescaler = 0
- Counter Period = 65535
- IC1 Filter = 10...15
- IC2 Filter = 10...15

STM32 буде автоматично визначати напрямок і рахувати імпульси.

Ініціалізація:

```c
extern TIM_HandleTypeDef htim3;

void Encoder_Init(void)
{
    HAL_TIM_Encoder_Start(&htim3,
                          TIM_CHANNEL_ALL);
}
```

Зчитування положення:

```c
int16_t Encoder_GetCount(void)
{
    return (int16_t)__HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim3);
}
```

Визначення кроків енкодера

Для меню зазвичай потрібно отримувати ±1 на кожен "клац".

```c
int8_t Encoder_GetStep(void)
{
    int16_t cnt = (int16_t)__HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim3);
    int16_t diff = cnt - old_cnt;

    if(diff >= 4)
    {
        old_cnt = cnt;
        return +1;
    }

    if(diff <= -4)
    {
        old_cnt = cnt;
        return -1;
    }

    return 0;
}
```

Число “4” використовується тому, що таймер у режимі Encoder TI1+TI2 рахує всі фронти (режим X4). EC11E на один механічний крок дає 4 лічильники таймера.

```c
int32_t menu_value = 0;

while(1)
{
    int8_t step = Encoder_GetStep();

    if(step > 0)
        menu_value++;

    if(step < 0)
        menu_value--;

    HAL_Delay(1);
}
```

Обробка кнопки EC11E (кнопка між входом і GND, вхід з Pull-Up):

```c
uint8_t Encoder_ButtonPressed(void)
{
    return (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOC,
                             GPIO_PIN_13) == GPIO_PIN_RESET);
}
```

Основні функції STM32 у DDS-генераторі.

1) управління DDS-архітектурою (інтерфейс):

- налаштування частоти – розраховує код частоти (Frequency Tuning Word) та передає його в DDS-чіп;

- управління фазою та формою – відправляє команди для зміни форми сигналу (синус, трикутник, меандр);

- протоколи зв'язку – використовує швидкі інтерфейси SPI або паралельну шину для завантаження даних у DDS.

2) взаємодія з користувачем (HMI)

- опитування органів управління – зчитує показання енкодера (EC11E) та клавіатури (кнопка енкодера Switch);

- виведення інформації – виводить поточну частоту, форму сигналу та меню на дисплеї (LCD, OLED, TFT).

3) живлення та системний контроль:

- калібрування – компенсує температурний дрейф частоти;

- пам'ять установок – зберігає останні налаштування частоти в енергонезалежну пам'ять (EEPROM/Flash).

Організація USB в мікроконтролерах STM32 реалізується на базі апаратного контролера USB 2.0 Full-Speed та зручного середовища STM32CubeIDE, що дозволяє уникнути ручного написання дескрипторів. Це дає змогу контролеру працювати в режимах віртуального COM-порту (VCP), клавіатури/миші (HID) або накопичувача (MSC).

Покроковий алгоритм розгортання та програмування порту USB на чипах STM32.

1. Апаратне підключення. Для стабільної роботи USB Full-Speed вимагає тактову частоту 48 МГц, яка зазвичай отримується від високошвидкісного зовнішнього кварцу (HSE) через систему PLL. Важливим нюансом для інтерфейсу є лінія DP (D+), яка обов'язково підтягується до напруги 3.3 В через резистор номіналом 1.5 кОм.

Налаштування в STM32CubeIDE:

- відкрити проєкт у STM32CubeIDE та перейти у конфігуратор Pinout & Configuration;

- у розділі Connectivity обрати USB_OTG_FS (або просто USB, залежно від моделі);

- у полі Mode вибрати Device_Only;

- у вкладці Middleware відкрити USB_DEVICE та оберати потрібний Class For FS IP (наприклад, Communication Device Class (Virtual Port Com) або Human Interface Device (HID))

2. Програмування та робота з кодом. Після генерації коду вся логіка обміну даними ховається у файлах usbd_cdc.c (або usbd_hid.c).

Для відправки даних використовується відповідна функція. Наприклад, для віртуального COM-порту:

```c
extern USBD_HandleTypeDef hUsbDeviceFS;
uint8_t buffer[] = "Hello USB!";
CDC_Transmit_FS(buffer, sizeof(buffer));
```

У головному циклі while(1) дані обробляються стейт-машиною USB-стеку, тому важливо не блокувати виконання програми довгими затримками. Перевірити, чи під'єднано пристрій до комп'ютера та чи завершив ПК ініціалізацію, можна шляхом опитування стану або колбеків.

3. Робота з ПК та Драйвери. Для режиму VCP комп'ютер розпізнає пристрій як віртуальний послідовний порт. Необхідно встановити драйвер STM32 Virtual COM Port Driver від STMicroelectronics, після чого порт з'явиться в Диспетчері пристроїв.

В якості пристрою виведення інформації в проєкті використовується графічний LCD дисплей 128x64 LCD12864Z із синім кольором світіння з процесором ST7920 (рис. 3.6-3.8)

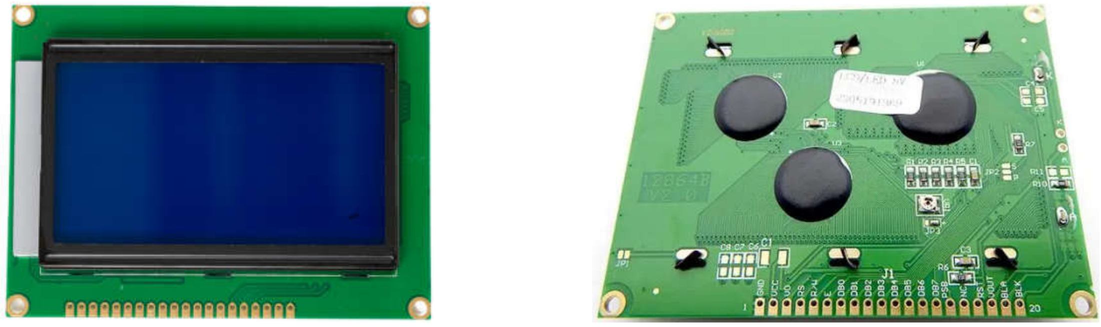


Рисунок 3.6 – Графічний LCD дисплей 128x64 LCD12864Z, синій колір світіння з графічним процесором ST7920

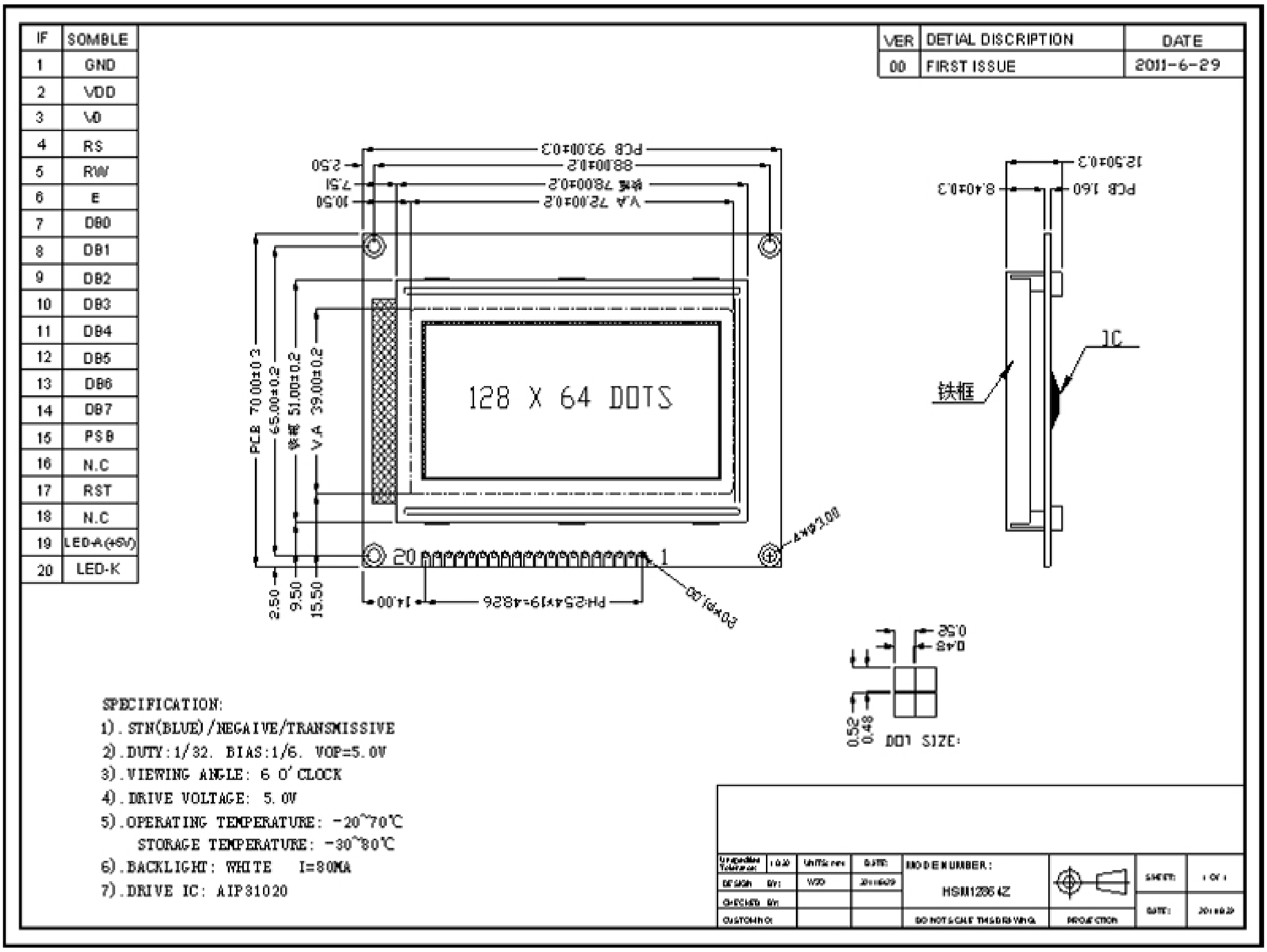


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд та призначення виводів графічного LCD дисплея 128x64 LCD12864Z

Дисплей LCD128x64 (модуль LCD12864Z) – може бути використаний для виведення текстової та графічної інформації. Має наступні технічні характеристики:

- напруга живлення модуля: 4,5...5,5 В;
- напруга живлення підсвічування: 3 ... 3,6 В;
- на базі чіпа: ST7920;
- струм споживаний модулем: до 5 мА;
- струм споживаний підсвічуванням: до 60 мА;

Колір підсвічування дисплея: синій;

- тип дисплею: LCD STN;
- розмір точок (пікселів) дисплея: 0,48x0,48 мм;
- кут огляду: 70 °;
- робоча температура: -20...+70 °С;
- температура зберігання: -30...80 °С;
- габарити: 92x69x12 мм Вага: 76 г

Підключення. Дисплей підтримує як паралельний, і послідовний інтерфейс передачі. Обидва інтерфейси підтримує і бібліотека U8glib, що дозволяє працювати з дисплеями 12864B V2.0. Для передачі даних за послідовним інтерфейсом бібліотека U8glib може використовувати апаратний і програмний SPI. За допомогою паралельного інтерфейсу або програмного SPI дисплей можна підключити до будь-яких виводів STM32. А при використанні апаратного SPI дисплей підключається тільки до виводів апаратної шини SPI.

Схема електрична принципова графічного LCD дисплея 128x64 LCD12864Z представлена на рис.3.8. Було вирішено використати паралельний протокол обміну інформацією, для чого вив. 15 (PSB) переведено в активний режим з підтяжкою до +5 В. Підсвічування організовано через обмежувальний резистор R4 на виводах 19 (корпус) і 20 (+5 В). За допомогою резистора R3 здійснюється регулювання контрасту Це забезпечує певну ергономічність при користуванні приладом в різних умовах зовнішнього освітлення (природними чи штучними джерелами). Напруга живлення самого дисплейного модуля подається на вив. 2 (Vcc).

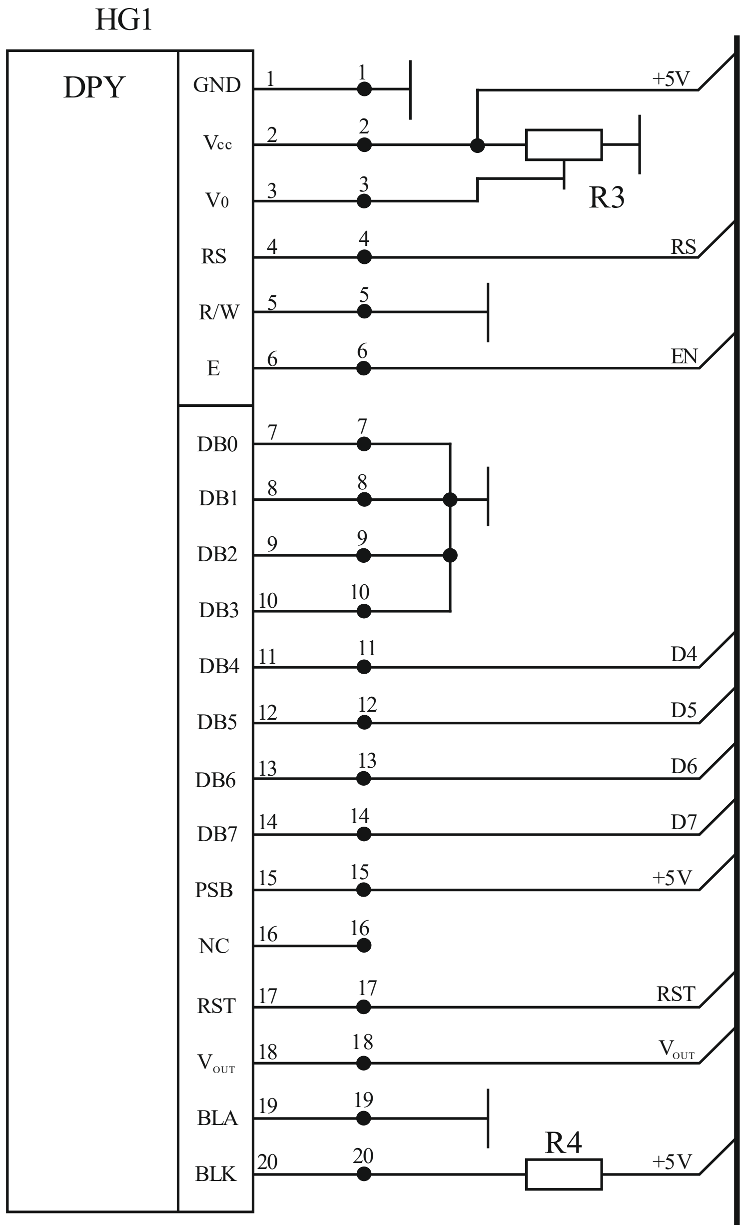


Рисунок 3.8 – Схема електрична принципова графічного LCD дисплея 128x64 LCD12864Z

Налаштування GPIO в CubeMX. Для всіх ліній:

- PB0, PB1, PB2, PB10 → Output Push-Pull;
- PC0..PC7 → Output Push-Pull;
- Speed → High;
- Pull-up/Pull-down → No Pull;

lcd12864.h:

```c
#ifndef __LCD12864_H
#define __LCD12864_H

#include "stm32f4xx_hal.h"

void LCD_Init(void);
void LCD_Clear(void);
void LCD_GotoXY(uint8_t row, uint8_t col);
void LCD_Print(char *str);

#endif
```

lcd12864.c:

```c
#include "lcd12864.h"

#define LCD_RS_GPIO GPIOB
#define LCD_RW_GPIO GPIOB
#define LCD_E_GPIO  GPIOB
#define LCD_RST_GPIO GPIOB

#define LCD_RS_PIN GPIO_PIN_0
#define LCD_RW_PIN GPIO_PIN_1
#define LCD_E_PIN  GPIO_PIN_2
#define LCD_RST_PIN GPIO_PIN_10

#define LCD_DATA_GPIO GPIOC

static void LCD_EnablePulse(void)
{
   HAL_GPIO_WritePin(LCD_E_GPIO, LCD_E_PIN, GPIO_PIN_SET);
   HAL_Delay(1);
   HAL_GPIO_WritePin(LCD_E_GPIO, LCD_E_PIN, GPIO_PIN_RESET);
}

static void LCD_WriteBus(uint8_t data)
{
   LCD_DATA_GPIO->ODR =
      (LCD_DATA_GPIO->ODR & 0xFF00) | data;
}

static void LCD_WriteCmd(uint8_t cmd)
{
   HAL_GPIO_WritePin(LCD_RS_GPIO, LCD_RS_PIN, GPIO_PIN_RESET);
   HAL_GPIO_WritePin(LCD_RW_GPIO, LCD_RW_PIN, GPIO_PIN_RESET);

   LCD_WriteBus(cmd);
   LCD_EnablePulse();

   HAL_Delay(2);
}

static void LCD_WriteData(uint8_t data)
{
   HAL_GPIO_WritePin(LCD_RS_GPIO, LCD_RS_PIN, GPIO_PIN_SET);
```

```
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_RW_GPIO, LCD_RW_PIN, GPIO_PIN_RESET);

    LCD_WriteBus(data);
    LCD_EnablePulse();

    HAL_Delay(1);
}

void LCD_Clear(void)
{
    LCD_WriteCmd(0x01);
    HAL_Delay(5);
}

void LCD_GotoXY(uint8_t row, uint8_t col)
{
    uint8_t addr;

    switch(row)
    {
        case 0: addr = 0x80 + col; break;
        case 1: addr = 0x90 + col; break;
        case 2: addr = 0x88 + col; break;
        case 3: addr = 0x98 + col; break;
        default: return;
    }

    LCD_WriteCmd(addr);
}

void LCD_Print(char *str)
{
    while(*str)
    {
        LCD_WriteData(*str++);
    }
}

void LCD_Init(void)
{
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_RST_GPIO,
                 LCD_RST_PIN,
                 GPIO_PIN_RESET);

    HAL_Delay(20);

    HAL_GPIO_WritePin(LCD_RST_GPIO,
                 LCD_RST_PIN,
                 GPIO_PIN_SET);

    HAL_Delay(50);

    LCD_WriteCmd(0x30);   // Function Set
    HAL_Delay(2);

    LCD_WriteCmd(0x0C);   // Display ON
    HAL_Delay(2);

    LCD_WriteCmd(0x06);   // Entry Mode
    HAL_Delay(2);

    LCD_Clear();
}
```

3.2. DDS генератор.

Згідно ТЗ, необхідно побудувати функціональний програмований генератор зі смугою до 40 МГц. Для цієї мети найкраще підходить мікросхема Analog Devices – AD9834 (рис. 3.8-3.10). AD9834 – це малопотужна 10-розрядна мікросхема прямого цифрового синтезу частоти (DDS), здатна генерувати високоякісні синусоїдальні, трикутні та прямокутні сигнали. Це недорога і поширена мікросхема, але вона має надзвичайно високі технічні параметри відповідно до офіційної документації (Datasheet) компанії Analog Devices [16]:

- напруга живлення – від 2,3 В до 5,5 В;
- максимальна тактова частота (MCLK) – 75 МГц;
- максимальна вихідна частота – до 37,5 МГц;
- розрядність акумулятора фази: 28 біт;
- розрізнювальна здатність – 0,28 Гц (при f_{CLK}=75 МГц).
- розрядність регістрів фази: 12 біт;
- розрядність ЦАП – 10 біт;
- вбудований компаратор;

3-провідний інтерфейс SPI® (сумісний з DSP, SPI, QSPI, MICROWIRE);

- динамічний діапазон, вільний від гармонік (SFDR): > 72 дБ;
- типи вихідних сигналів – синусоїдальний, трикутний, прямокутний
- максимальний вихідний струм ЦАП – до 4 мА;
- розширений діапазон температур: від −40°C до +105°C
- опція вимкнення живлення;
- споживана потужність 20 мВт;
- внутрішні регістри частоти: 2 незалежні регістри (FREQ0 та FREQ1);
- внутрішні регістри фази: 2 незалежні регістри (PHASE0 та PHASE1);
- можливості модуляції: частотна (FSK) та фазова (PSK) модуляція; перемикання здійснюється апаратно через виводи (FSELECT, PSELECT) або програмно.

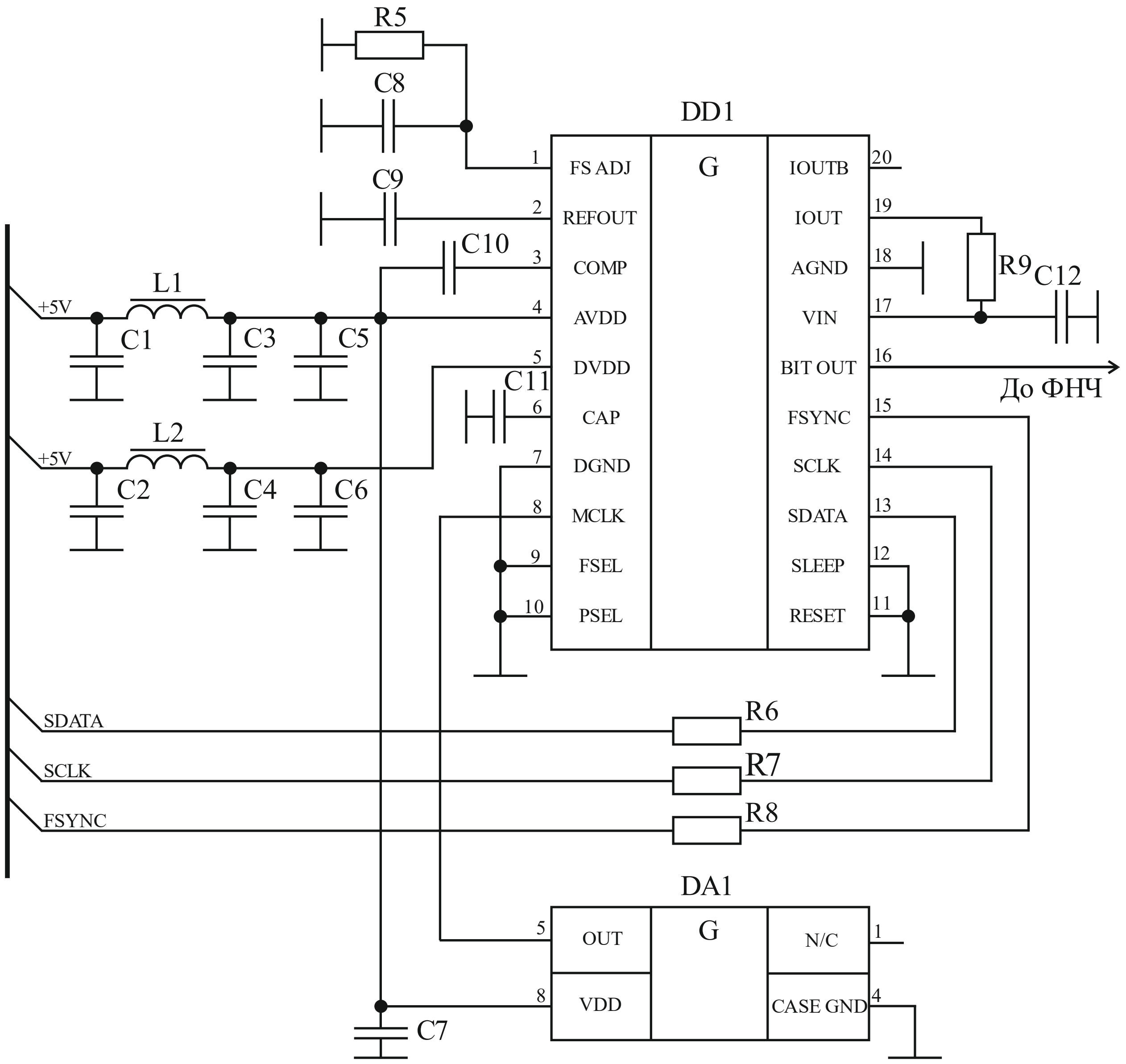


Рисунок 3.8 – DDS генератор на основі мікросхеми AD9834

Кола живлення аналогової і цифрової частин мікросхеми DDS розділені: на вході стоять якісні кола фільтрації:

- аналогова частина: L1, C1, C3, C5;

- цифрова частина: L2, C2, C4, C4.

Це П-подібні LC-фільтри, параметри яких залежать від типу мікросхеми та діапазону частот, який формує даний DDS генератор.

Керується генератор від модуля STM32 сигналами SDATA (вив. 13), SCLK (вив. 14), FSYNC (вив. 15).

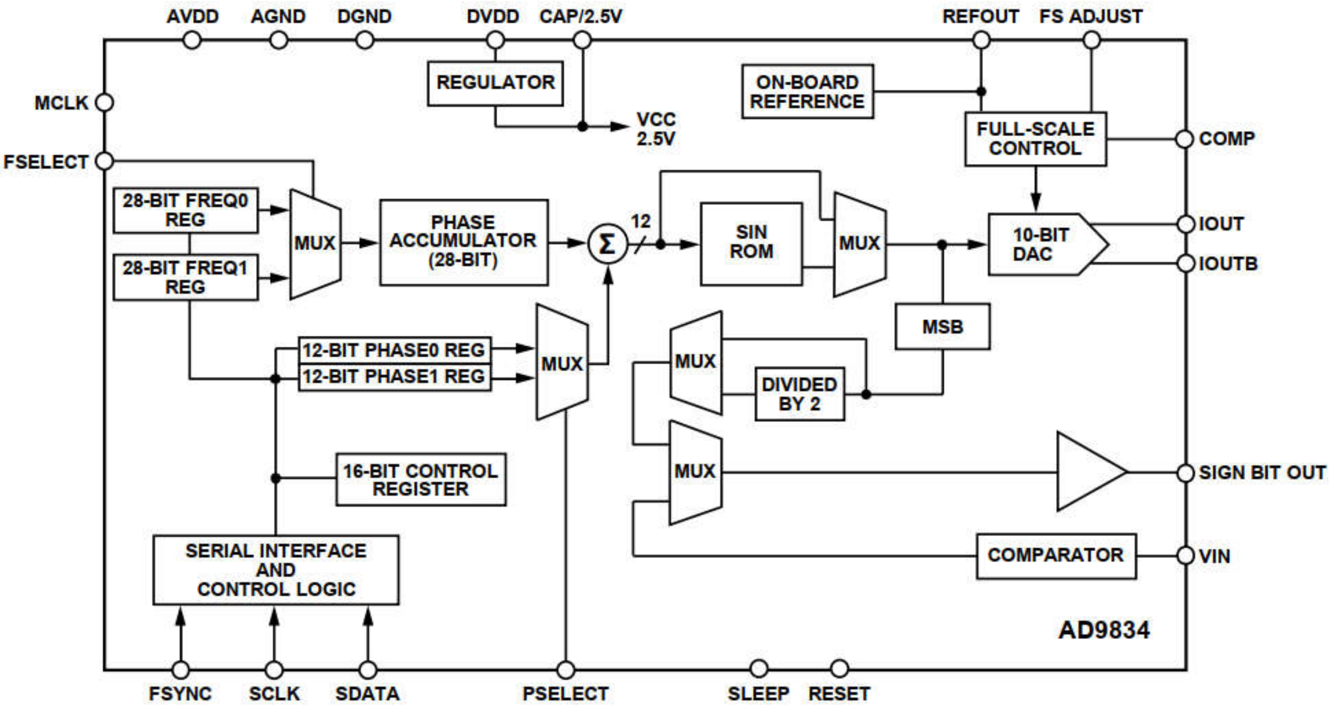


Рисунок 3.9 – Блок-схема внутрішньої будови ІМС AD9834

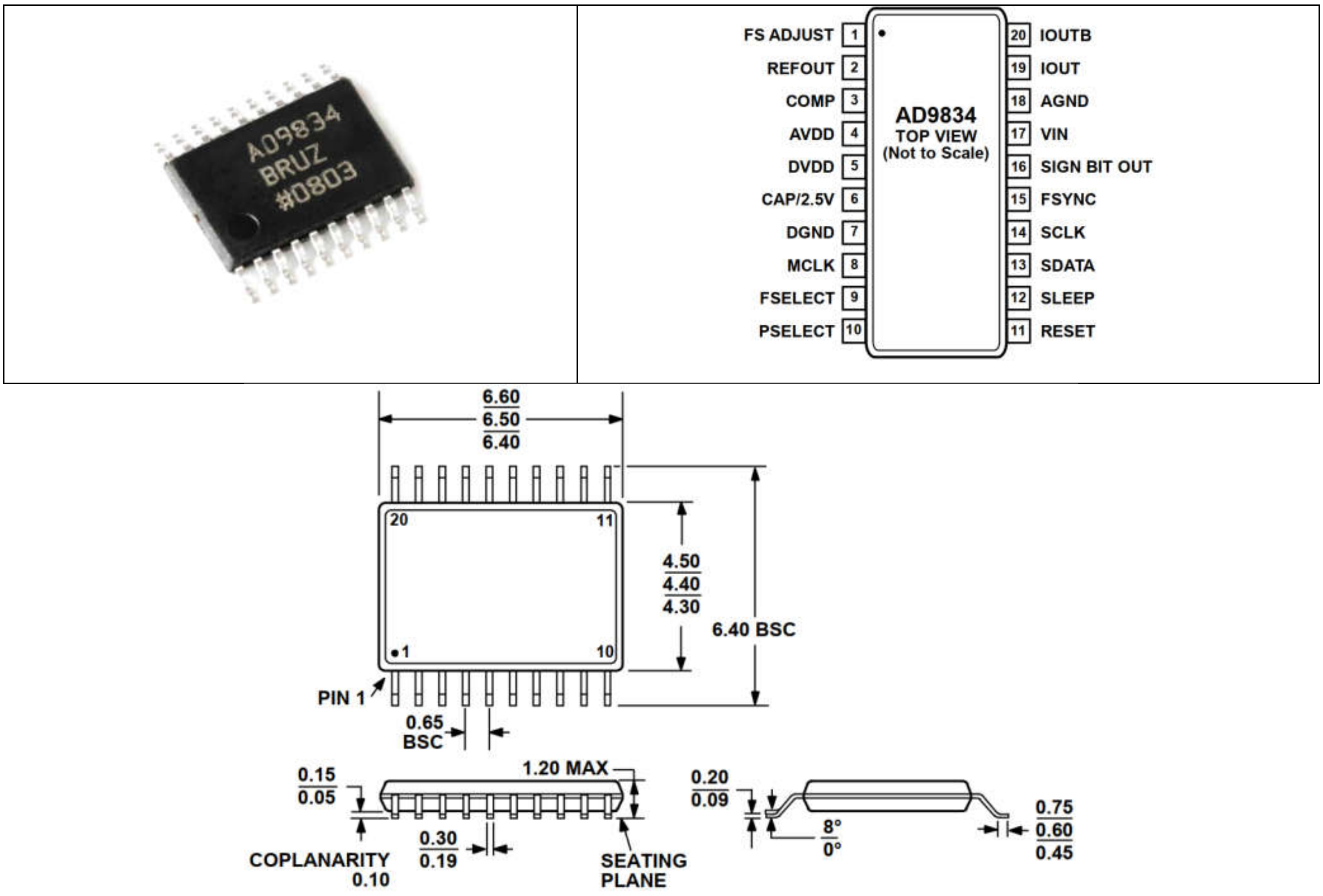


Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд та призначення виводів ІМС AD9834

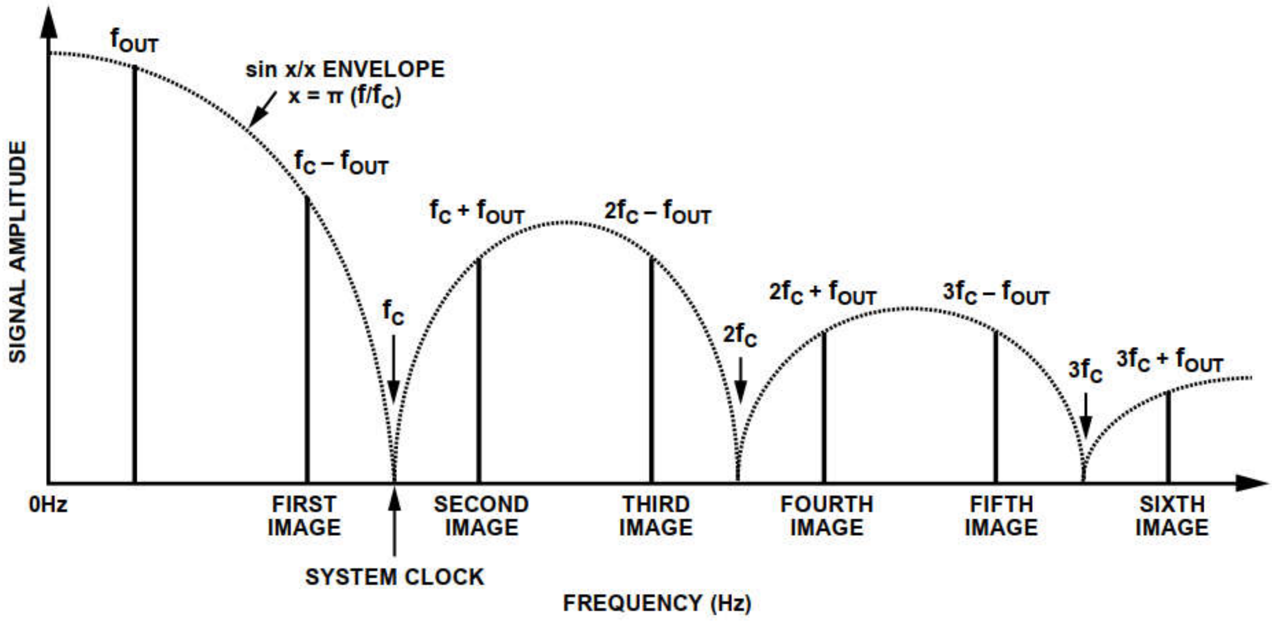


Рисунок 3.11 – Спектр вихідних сигналів ЦАП

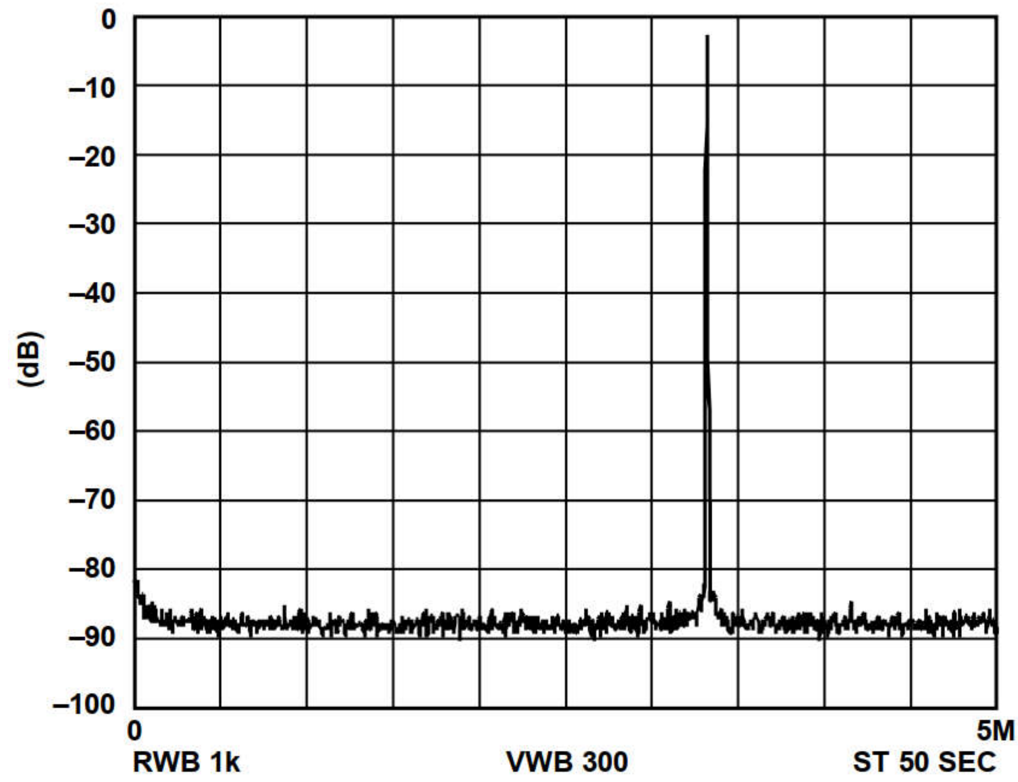


Рисунок 3.12 – Спектр вихідних сигналів ЦАП

f_{MCLK}=10 МГц; f_{OUT}=3,33 МГц=$f_{MCLK/3}$, Слово керування – 5555555

Синусоїди зазвичай розглядаються з точки зору їхньої форми $a(t)=sin(\omega t)$. Однак вони нелінійні та їх нелегко генерувати, окрім як за допомогою кусково-побудованої структури. З іншого боку, кутова інформація має лінійний характер, тобто фазовий кут обертається на фіксований кут за кожну одиницю часу. Кутова швидкість залежить від частоти сигналу з традиційною швидкістю $\omega=2\pi f$.

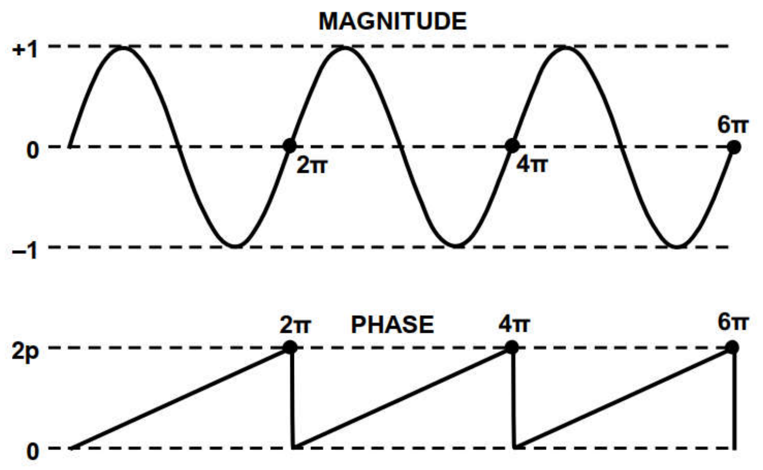


Рисунок 3.13 – Принцип формування сигналів ІМС AD9834

Знаючи, що фаза синусоїди є лінійною, і враховуючи інтервал опорного сигналу (період тактової частоти), можна визначити обертання фази для цього періоду:

$$\Delta Phase=\omega\Delta t \quad (3.1)$$

Вирішуючи для ω,

$$\omega=\Delta Phase/\Delta t=2\pi f \quad (3.2)$$

Вирішуючи для f та підставляючи опорну частоту тактової частоти для періоду опорного сигналу $1/f_{MCLK}=\Delta t$:

$$f=\Delta\, Phase\times f_{MCLK}/2\pi \quad (3.3)$$

AD9834 формує вихідний сигнал на основі цього простого рівняння. Простий DDS-чіп може реалізувати це рівняння за допомогою трьох основних підсхем: генератор з числовим керуванням + фазовий модулятор, SIN ROM та цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП).

Тактовий генератор (опорний генератор) є серцем DDS-системи та визначає всі ключові характеристики вихідного сигналу. Прямий цифровий синтез (DDS) будує вихідний сигнал крок за кроком зчитуючи цифрові значення з пам'яті з кожним тактовим імпульсом. Якість, частота та стабільність цього «фундаменту» безпосередньо задають межі можливостей всього пристрою. Основні функції тактового генератора в DDS:

- завдання кроку дискретизації (за кожен такт опорної частоти f_{clk} акумулятор фази DDS розраховує нову адресу в таблиці синуса, а ЦАП видає одну точку форми сигналу);

- визначення максимальної частоти – відповідно до теореми Котельникова (Найквіста), теоретична межа частоти вихідного сигналу дорівнює половині тактової частоти $f_{out_max} < f_{clk}/2$.

Установка кроку перелаштування частоти. Роздільна здатність за частотою (Δf) жорстко пов'язана з тактовою частотою та розрядністю акумулятора фази (N) співвідношенням:

$$\Delta f = \frac{f_{clk}}{2^N} \tag{3.4}$$

Вплив параметрів тактового генератора на вихідний сигнал джиттер та фазовий шум. Фазова нестабільність тактового генератора безпосередньо переноситься на вихідний сигнал. Високий джиттер розмиває спектр сигналу та збільшує рівень паразитних складових (шпор).

Температурний дрейф. Якщо частота тактового генератора пливе від нагрівання, пропорційно пливе і вихідна частота DDS. Для високої точності застосовують термокомпенсовані (TCXO) або термостатовані (OCXO) кварцові генератори. Стабільність амплітуди такту: Коливання рівня тактового сигналу на

вході DDS мікросхеми можуть порушити внутрішній таймінг логічних осередків і збільшити рівень шумів ЦАП.

Тактовий генератор – важлива складова проектованого пристрою, яка визначає короткочасну та довготривалу стабільність приладу в цілому. Було обрано достатньо високостабільний пристрій – JCO-14-3-B, представлений вище на рис. 3.8. Згідно технічних характеристик DDS AD9834, максимальна частота тактового генератора може складати 75 МГц. JCO-14-3-B повністю відповідає цим ТУ:

- вихідна частота: 75 МГц;
- напруга живлення: 5 В± (I=40 мА);
- стабільність частоти: 10 ppm;
- рівень вихідного сигналу: 0,5 В;
- вихідна ємність: 50 пФ.

3.3. ФНЧ.

Для усунення паразитних складових на виході DDS і забезпечення спектральної чистоти використовується фільтр низьких частот ФНЧ. Він є обов'язковим елементом більшості DDS-синтезаторів (Direct Digital Synthesis), оскільки вихідний сигнал DDS після цифро-аналогового перетворювача містить не лише корисну частоту, а й численні високочастотні складові та спектральні образи.

Після ЦАП на виході присутні:

- основний сигнал з потрібною частотою f_{out};
- гармоніки спектру на частотах f_{clk}±f_{out}, 2f_{clk}±f_{out}, 3f_{clk}±f_{out} тощо;
- шуми квантування;
- паразитні гармоніки.

ФНЧ пропускає корисний сигнал і пригнічує всі компоненти вище своєї граничної частоти.

Основні вимоги до ФНЧ для DDS:

1) частота зрізу повинна:

- бути вищою за максимальну робочу частоту DDS;

- бути значно нижчою за частоту тактування ЦАП.

2) мати високе загасання на гармоніках; перша спектральна складова з'являється поблизу: $f_{image}=f_{clk}-f_{out}$

Фільтр має забезпечувати достатнє ослаблення на частотах 40 МГц і вище.

Типові вимоги:

- не менше 40 дБ для простих систем;

- 60-80 дБ для вимірювальної апаратури;

- понад 80 дБ для високоякісних генераторів.

3) рівномірність АЧХ у смузі пропускання; у робочому діапазоні амплітуда сигналу не повинна істотно змінюватися. Типові значення:

- ±1 дБ для звичайних пристроїв;

- ±0,1 дБ для вимірювальних генераторів.

4) лінійність фазової характеристики; якщо важлива форма сигналу (наприклад, для модуляції або імпульсних сигналів), необхідно мінімізувати фазові спотворення. Для цього застосовують:

- фільтри Бесселя – найкраща фазова лінійність;

- фільтри Баттерворта – компроміс між АЧХ і фазою;

- фільтри Чебишева або еліптичні – коли потрібен дуже крутий спад.

5) узгодження з навантаженням; фільтр зазвичай розраховується на конкретний хвильовий опір:

- 50 Ом у радіотехнічних системах;

- інші значення для спеціалізованих пристроїв.

6) мінімальні власні шуми та нелінійності; для якісного DDS важливо, щоб ФНЧ:

- не вносив додаткових гармонік;

- не погіршував SFDR (Spurious-Free Dynamic Range);

- не створював інтермодуляційних спотворень.

Тому використовують високодобротні котушки та конденсатори з малими втратами.

Схема електрична принципова розробленого ФНЧ представлена на рис. 3.14).

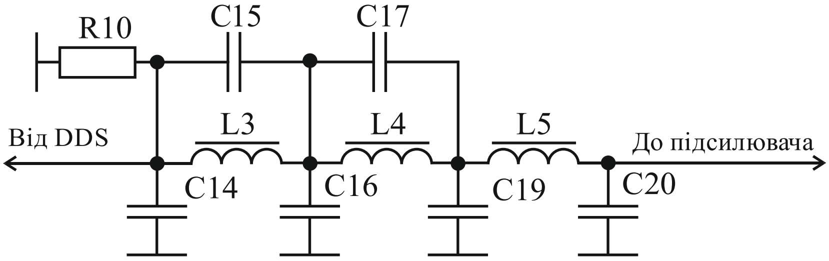


Рисунок 3.14 – Спроєктований ФНЧ

3.4. Підсилювач-коректор.

Щоби забезпечити широкосмуговість спроектованого генератора, необхідно мати підсилювач, у якого лінійна АЧХ на ділянці спектру більше нашої робочої частоти – 37,5 МГц, з деяким запасом. Мікросхема AD81 (рис. 3.15) представляє собою низьковольтовий операційний відео підсилювач з граничною частотою порядку 75-80 МГц (3 dB) (рис. 3.16).

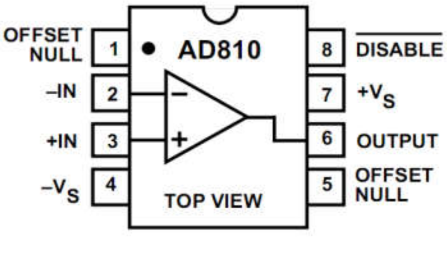


Рисунок 3.15 – Зовнішній вигляд та призначення виводів ІМС AD810

Цього більш ніж достатньо для реалізації необхідного підсилення. Окрім того, на даний каскад покладається функція вихідного буфера з узгодженням опору навантаження до 50 Ом.

Як видно з характеристик і технічних параметрів мікросхеми, вона потребує двох полярної напруги живлення.

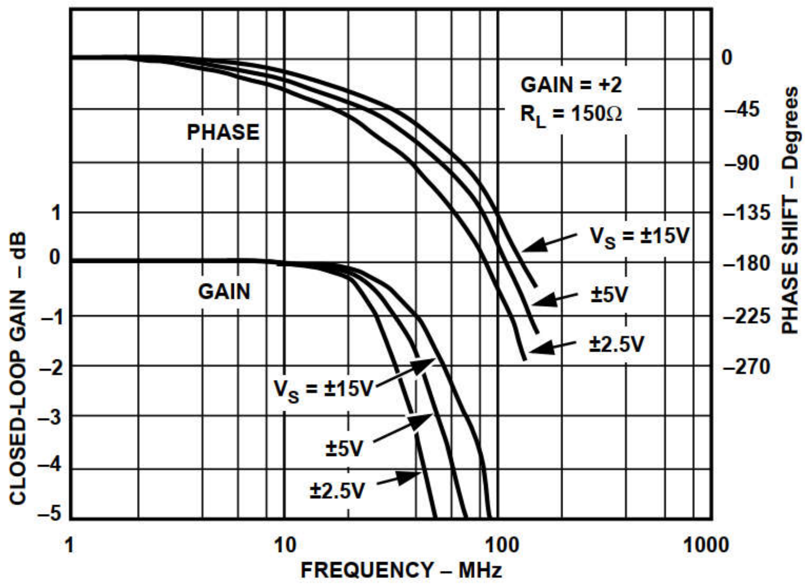


Рисунок 3.16 – Частотна характеристика ІМС AD810

Схема електрична принципова підсилювача-коректора на ІМС AD810 представлена на рис. 3.17.

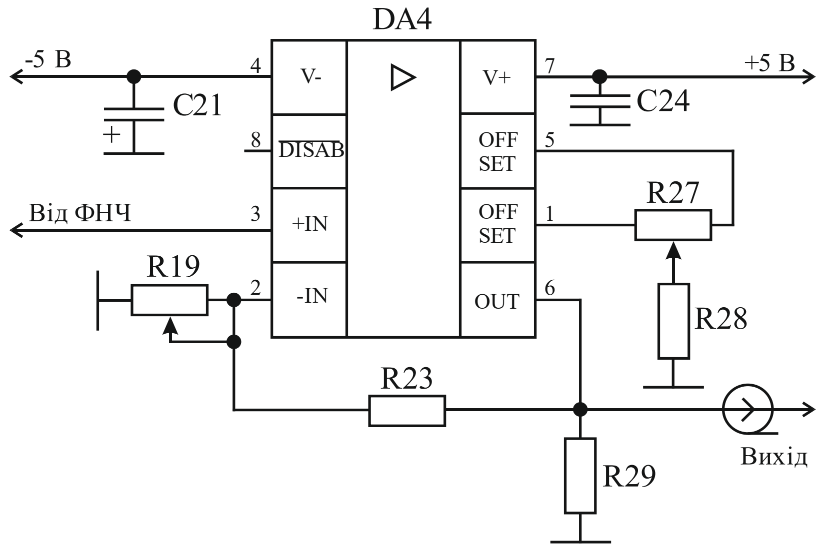


Рисунок 3.17 – Схема електрична принципова підсилювача-коректора на ІМС AD810

Резистор R19 задає коефіцієнт підсилення, а R27 – зміщення нуля, що досить зручно для функціонального генератора.

3.5. Атенюатор.

Резистивний атенюатор у функціональному генераторі служить для зменшення амплітуди вихідного сигналу до потрібного рівня без істотної зміни його форми.

Основні функції атенюатора:

- регулювання амплітуди вихідного сигналу;

- дозволяє отримувати широкий діапазон вихідних напруг (наприклад, від кількох мілівольт до десятків вольт);

- можливість реалізується як набір перемикачів із фіксованими коефіцієнтами ослаблення (×1, ×0,1, ×0,01 тощо).

- збереження форми сигналу(на відміну від деяких активних схем, правильно спроєктований резистивний атенюатор практично не вносить спотворень у синусоїдальні, прямокутні чи трикутні сигнали);

- узгодження з навантаженням (допомагає підтримувати заданий вихідний опір генератора 50 Ω, що важливо для точності рівня сигналу та мінімізації відбиттів у високочастотних колах);

- захист наступних каскадів (дає змогу подавати на досліджуваний пристрій сигнал без перевантаження його входу надмірною напругою).

Типово атенюатор являє собою подільник напруги на резисторах. Для найпростішого випадку коефіцієнт передачі визначається як:

$$U_{OU}T = U_{IN}\frac{R2}{R1+R2} \qquad (3.5)$$

де R1 і R2 – резистори подільника.

Отже, резистивний атенюатор у функціональному генераторі є вихідним вузлом, який забезпечує точне ослаблення та регулювання рівня сигналу при збереженні його форми і заданого вихідного опору. В нашому випадку було вирішено підібрати дискретні ланки атенюатора з коефіцієнтами ділення 1, 2, 3, 5, 10, 20 дБ. Такий підбір коефіцієнтів має велику варіативність.

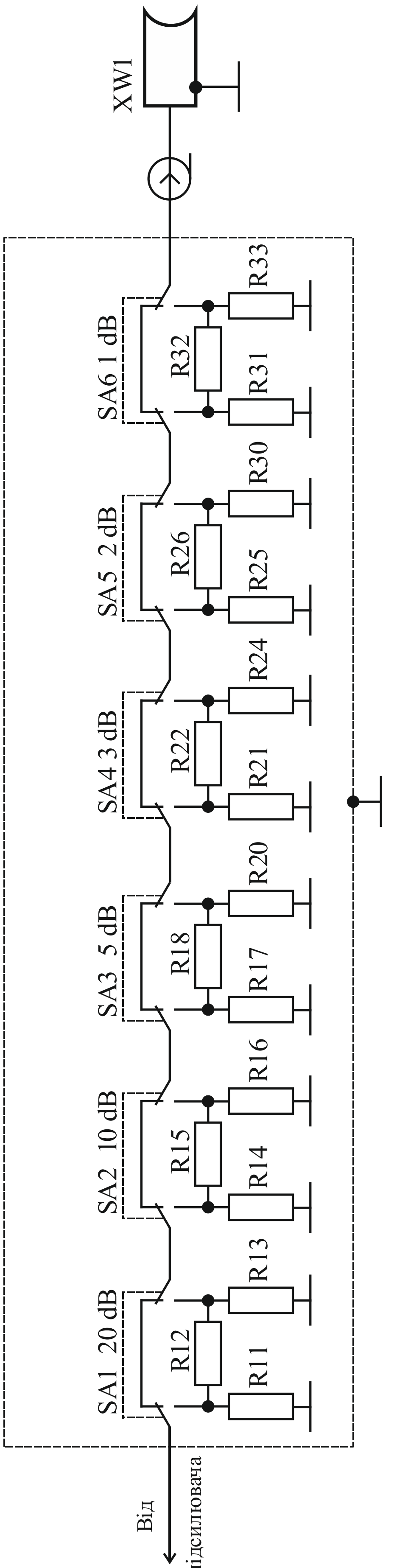


Рисунок 3.18 – Схема електрична принципова атенюатора

3.6. Блок живлення.

Як було сказано вище, до блока живлення пред’являлися ряд вимог:

- живлення від порту USB (наприклад павербанку чи ноутбука);
- автономне живлення від зовнішнього акумулятора;
- формування напруги живлення STM32 +3.3 В;
- формування двохполярної напруги ±5 В.

Такий пристрій було спроектовано (рис. 3.19).

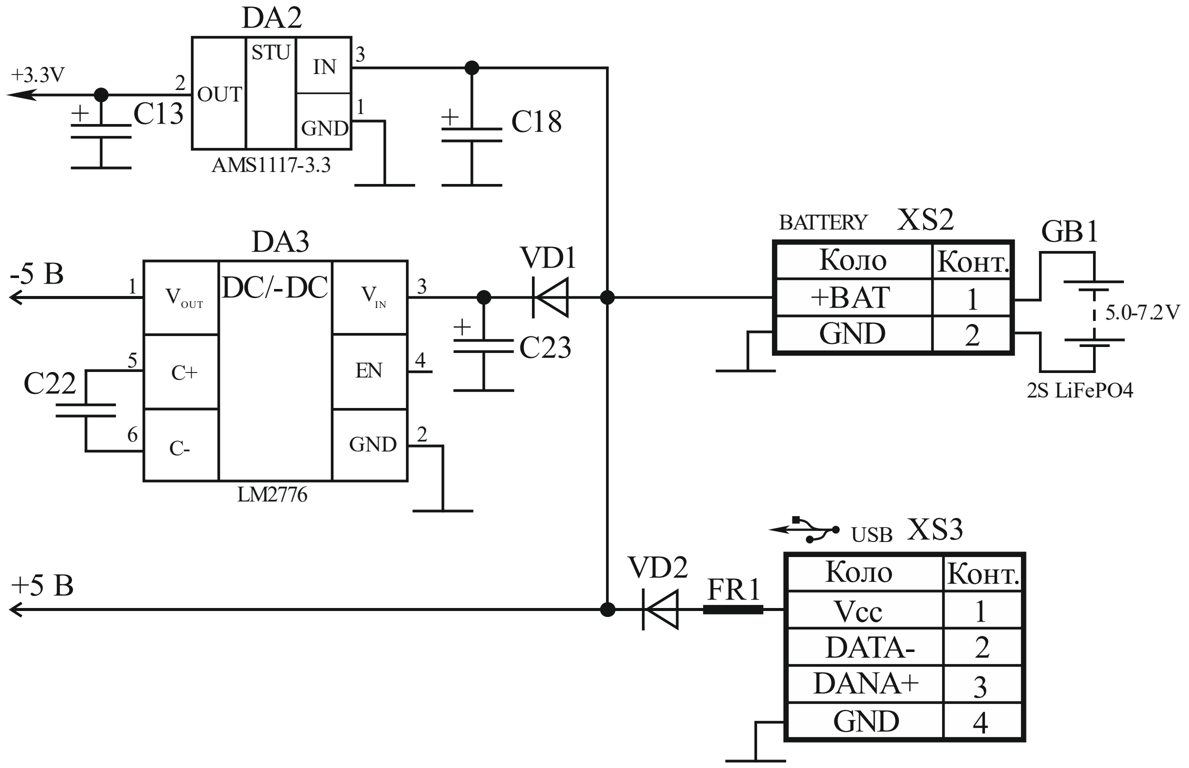


Рисунок 3.19 – Схема електрична принципова блоку живлення

Напруга живлення може надходити з порту USB, або з акумулятора. Для розділення вказаних кіл використовуються комутуючі діоди VD1, VD2. Так, у разі живлення від USB, відбувається ще й заряд акумулятора.

Мікросхема DA2 представляє собою лінійний стабілізатор напруги 3.3 В, яка використовується для живлення STM32 (рис. 3.20).

Мікросхема DA3 (LM2776) – DC/DC перетворювач-інвертор. Вона формує з напруги +5 В інверсну напругу -5 В.

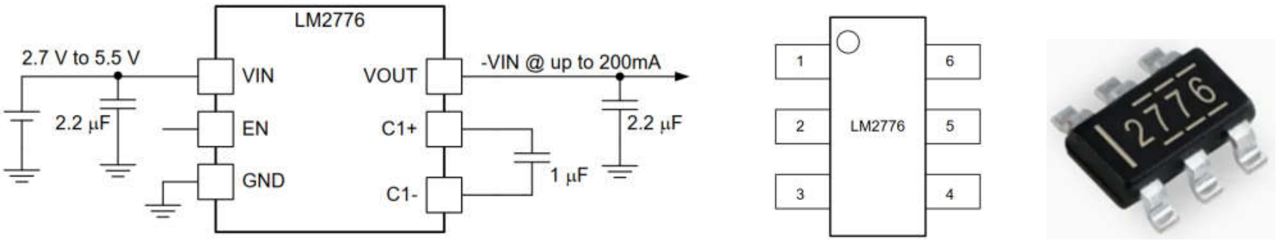
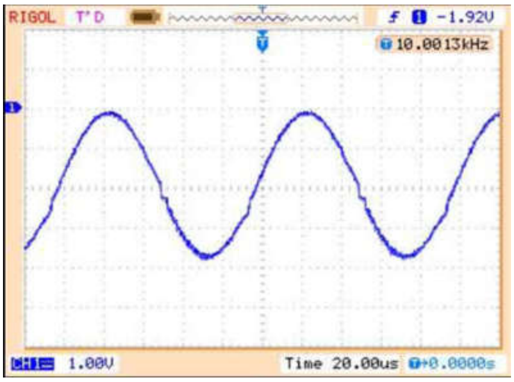


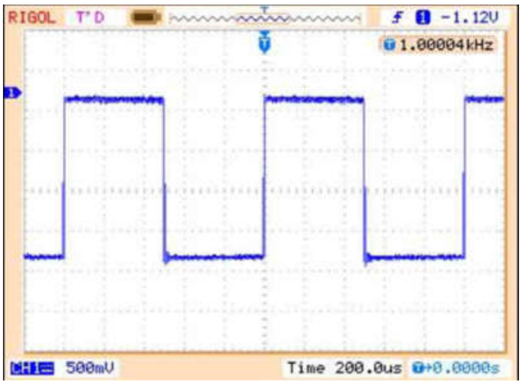
Рисунок 3.20 – Зовнішній вигляд, призначення виводів

і типова схема ввімкнення ІМС LM2776

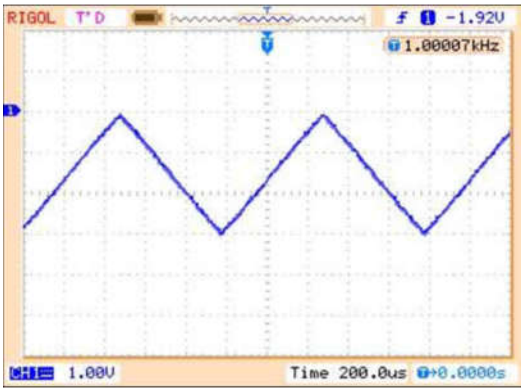
Генератор формує наступні сигнали (рис. 3.21): на виході каналу 1 – синусоїдальний (а) і трикутний (б), а на виході 2 – прямокутний (в) і білий шум (г).



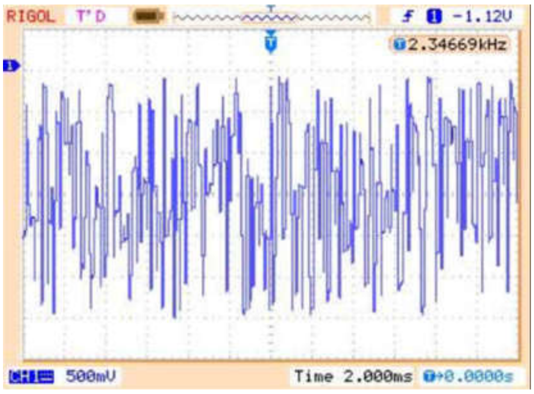
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.21 – Форма вихідних сигналів

а) синусоїдальний, б) прямокутний, в) трикутний, г) білий шум

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Згідно технічного завдання, виданого кафедрою телекомунікацій, недійних та інтелектуальних технологій, спроєктовано схему електричну принципову програмованого генератора сигналів на базі STM32. Детально обґрунтовано та проаналізовано вибір платформи реалізації на основі платформи розробника STM32 з мікроконтролером STM32F401RCT6.

2. Розроблено програмні модулі роботи SMT32 з периферією:

- органами керування (енкодер+кнопка);
- графічним дисплеєм;
- DDS генератором;
- USB портом.

3. Спроєктований програмований генератор сигналів на базі STM32 одержав наступні технічні характеристики:

- форма сигналу: синусоїда, прямокутна, трикутна, білий шум;
- діапазон частот: 0...37,5 МГц;
- розрізнювальна здатність: 0,28 Гц;
- амплітуда вихідного сигналу: -5…0...5 В (з регулюванням зміщення відносно “0”);
- атенюатор: 0; -1 dB, -2 dB, -3 dB, -5 dB, -10 dB, -20 dB;
- стабільність частоти: $\pm 10 \cdot 10^{-6}$;
- вихідний опір: 50 Ω;
- графічний дисплей 128х64;
- керування за допомогою енкодера з фіксуючою кнопко.

ВИСНОВКИ

1. В роботі приведена класифікація генераторів сигналів за формою вихідного сигналу, за частотним діапазоном, за принципом дії та схемотехнікою, за призначенням, за типом модуляції та інш. З проведеного аналізу слідує, що сучасні генератори використовують два основних методи формування сигналів: класичний аналоговий ФАПЧ (ЧАПЧ) та більш сучасний цифровий – Direct Digital Synthesis (DDS). Детально розглянуто типові промислові зразки генераторів сигналів – обрано та проаналізовано пристрій-прототип.

2. Проведене техніко-економічне обґрунтування, яке показало доцільність розробки програмованого генератора сигналів на базі STM32 і DDS-синтезатора. Використання цифрового синтезу сигналів дозволяє отримати високі технічні характеристики при відносно невеликих витратах на реалізацію. Собівартість дослідного зразка є значно нижчою за вартість комерційних аналогів, а функціональні можливості повністю задовольняють потреби навчальних лабораторій, сервісних центрів та невеликих дослідницьких підрозділів. Економічні розрахунки підтверджують ефективність проєкту та перспективність його подальшого впровадження. Розроблений пристрій може розглядатися як конкурентоспроможне рішення в сегменті доступного вимірювального обладнання, а також як платформа для подальших науково-технічних досліджень і модернізації. Згідно технічного завдання та вимог до кваліфікаційних проєктів, розроблено схему електричну структурну. Пристрій містить наступні функціональні складові:

- платформа розробника (STM32);
- органи керування;
- LCD дисплей;
- DDS генератор;
- тактовий генератор;
- фільтр нижніх частот (ФНЧ);

- підсилювач-коректор;

- атенюатор;

- блок живлення.

3. Згідно технічного завдання, виданого кафедрою телекомунікацій, недійних та інтелектуальних технологій, спроєктовано схему електричну принципову програмованого генератора сигналів на базі STM32. Детально обґрунтовано та проаналізовано вибір платформи реалізації на основі платформи розробника STM32 з мікроконтролером STM32F401RCT6.

2. Розроблено програмні модулі роботи SMT32 з периферією:

- органами керування (енкодер+кнопка);

- графічним дисплеєм;

- DDS генератором;

- USB портом.

3. Спроєктований програмований генератор сигналів на базі STM32 одержав наступні технічні характеристики:

- форма сигналу: синусоїда, прямокутна, трикутна, білий шум;

- діапазон частот: 0...37,5 МГц;

- розрізнювальна здатність: 0,28 Гц;

- амплітуда вихідного сигналу: -5…0...5 В (з регулюванням зміщення відносно “0”);

- атенюатор: 0; -1 dB, -2 dB, -3 dB, -5 dB, -10 dB, -20 dB;

- стабільність частоти: $\pm 10 \cdot 10^{-6}$;

- вихідний опір: 50 Ω;

- графічний дисплей 128х64;

- керування за допомогою енкодера з фіксуючою кнопко.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mastering STM32 / Carmine Noviello. – 2nd ed. – Victoria : Leanpub, 2022. – 910 p.
2. The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors / Joseph Yiu. – 3rd ed. – Oxford : Newnes, 2014. – 832 p.
3. Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in Assembly Language and C / Yifeng Zhu. – Ann Arbor : E-Man Press LLC, 2023. – 800+ p.
4. STM32 Arm Programming for Embedded Systems / Muhammad Ali Mazidi, Sarmad Naimi, Sepehr Naimi. – Sunnyvale : MicroDigitalEd, 2018. – 650 p.
5. The Designer's Guide to the Cortex-M Processor Family / Trevor Martin. – Oxford : Newnes, 2016. – 640
6. Мікроконтролери сімейства ARM Cortex-M / О. В. Третяк, В. М. Бондаренко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 312 с.
7. STMicroelectronics. STM32F103x8/B, STM32F103xC/D/E Datasheet. – Geneva : STMicroelectronics, 2023. – 166 p.
8. STMicroelectronics. STM32F4 Series Reference Manual RM0090. – Geneva : STMicroelectronics, 2024. – 1749 p.
9. The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors / Joseph Yiu. – 3rd ed. – Oxford : Newnes, 2014. – 832 p.
10. Mastering STM32 / Carmine Noviello. – Independently Published, 2018. – 678 p.
11. Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in Assembly Language and C / Yifeng Zhu. – 3rd ed. – California : E-Man Press LLC, 2020. – 816 p.
12. Digital Signal Processing Using ARM Cortex-M Based Microcontrollers / Liqiang Wang. – Beijing : Higher Education Press, 2018. – 420 p.
13. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits / Sergio Franco. – New York : McGraw-Hill Education, 2014. – 672 p.

14. Microelectronic Circuits / Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith. – New York : Oxford University Press, 2015. – 1464 p.

15. Signals and Systems / Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1996. – 957 p.

16. ARM Developer Documentation. ARM Cortex-M Architecture Reference Manual. – ARM Ltd., 2024.

17. Embedded Systems: Real-Time Interfacing to ARM Cortex-M Microcontrollers / Jonathan W. Valvano. – 4th ed. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2021. – 522 p.

18. STM32 Application Notes. Using the DAC and Timers for Waveform Generation in STM32 Microcontrollers. – STMicroelectronics, 2024.

ДОДАТКИ

ПЛАКАТ 1

ВИБІР ПРИСТРОЮ-ПРОТОТИПУ

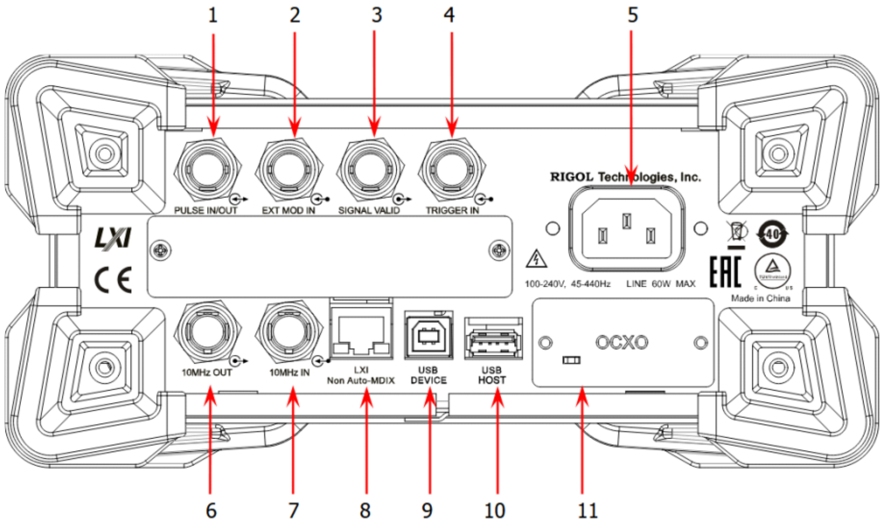


Рисунок 1.1– Задня панель генератора сигналів RIGOL DSG815:
1 – роз'єм входу/виходу імпульсного сигналу; 2 – вхідний роз'єм зовнішньої модуляції; 3 – роз'єм вихідного сигналу синхронізації; 4 – вхідний роз'єм зовнішнього тригера; 5 – роз'єм живлення ~220 В; 6 – вихідний роз'єм опорного сигналу; 7 – вхідний роз'єм опорного сигналу; 8 – LAN роз'єм; 9 – USB типу B; 10 – USB типу A; 11 – джерело опорного сигналу (OCXO)

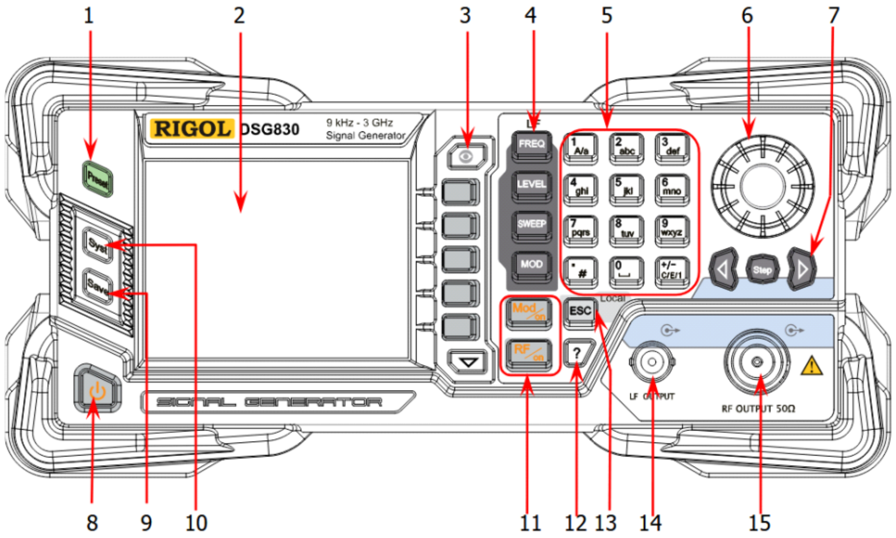


Рисунок 1.2 – Органи управління генератора сигналів RIGOL DSG815:
1 – кнопка «Скидання»; 2 – LCD дисплей; 3 – кнопка «Меню»; 4 – функціональні кнопки; 5 – локальна клавіатура; 6 – енкодер регулювання; 7 – кнопки напрямку/кроків; 8 – вимикач живлення; 9 – кнопка збереження та повторного виклику; 10 – кнопка налаштувань системи; 11 – кнопка керування виходом; 2 – вбудована система довідки; 13 – кнопка «ESC»; 14 – вихідний роз'єм НЧ; 15 – вихідний роз'єм ВЧ

ПЛАКАТ 2

ПЛАТФОРМА РОЗРОБКИ

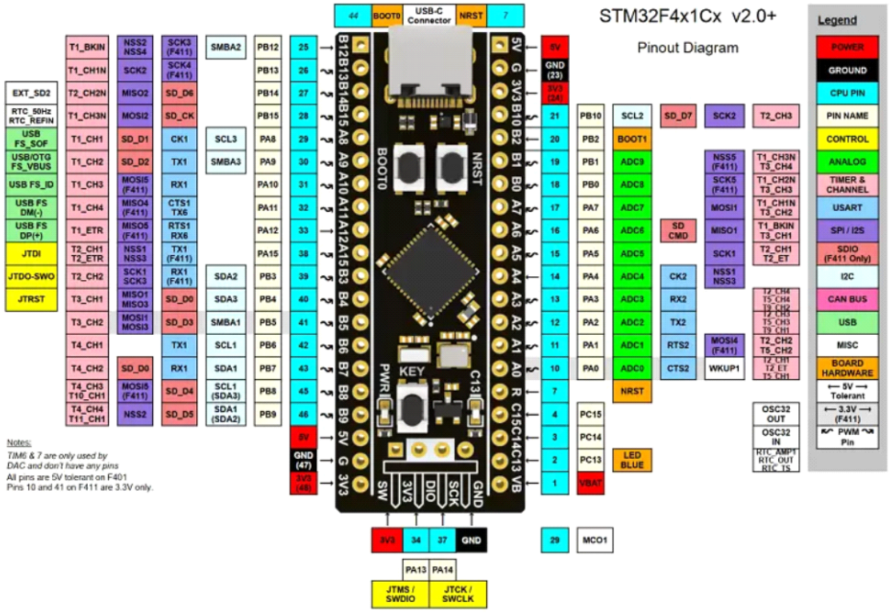


Рисунок 2.1 – Модуль STM32
на базі мікроконтролера STM32F401RCT6

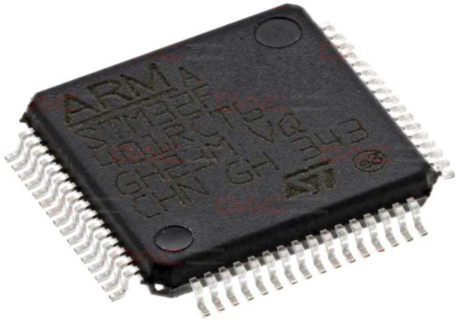


Рисунок 2.2 – Мікроконтролер STM32F401RCT6

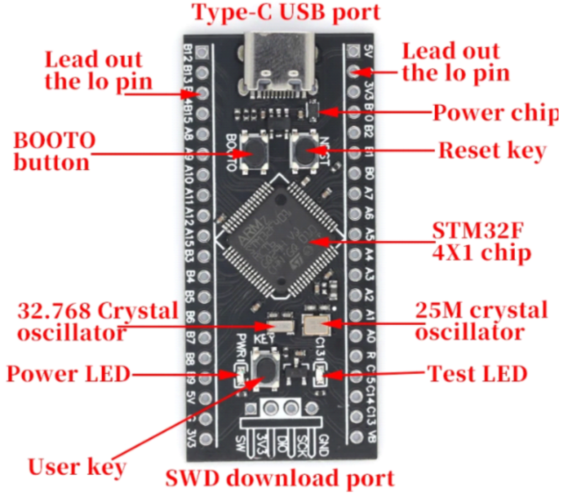


Рисунок 2.3 – Склад модуля STM32:
зліва і справа виводи для під'єднання; кнопка BOOT – для програмування;
кнопка Reset – для скидання; чіп STM32F401RCT6;
кварцовий резонатор 32,768 кГц (часовий);
- кварцовий резонатор 25 МГц (тактовий); світлова індикація (живлення і тест);
- кнопка User Key – для тестування та взаємодії з програмою;
роз'єм SWD (Serial Wire Debug) – двохпровідний інтерфейс
-для програмування та відладки.

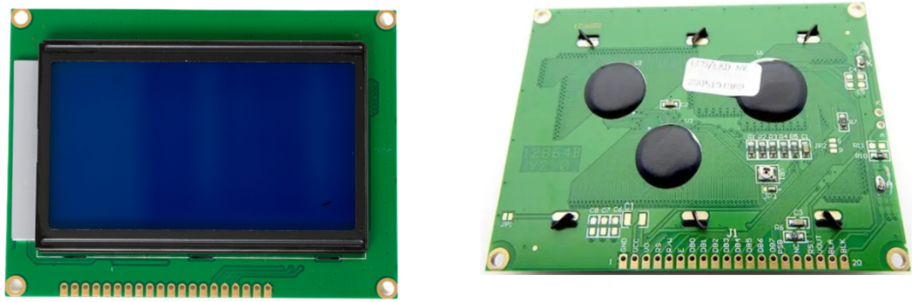
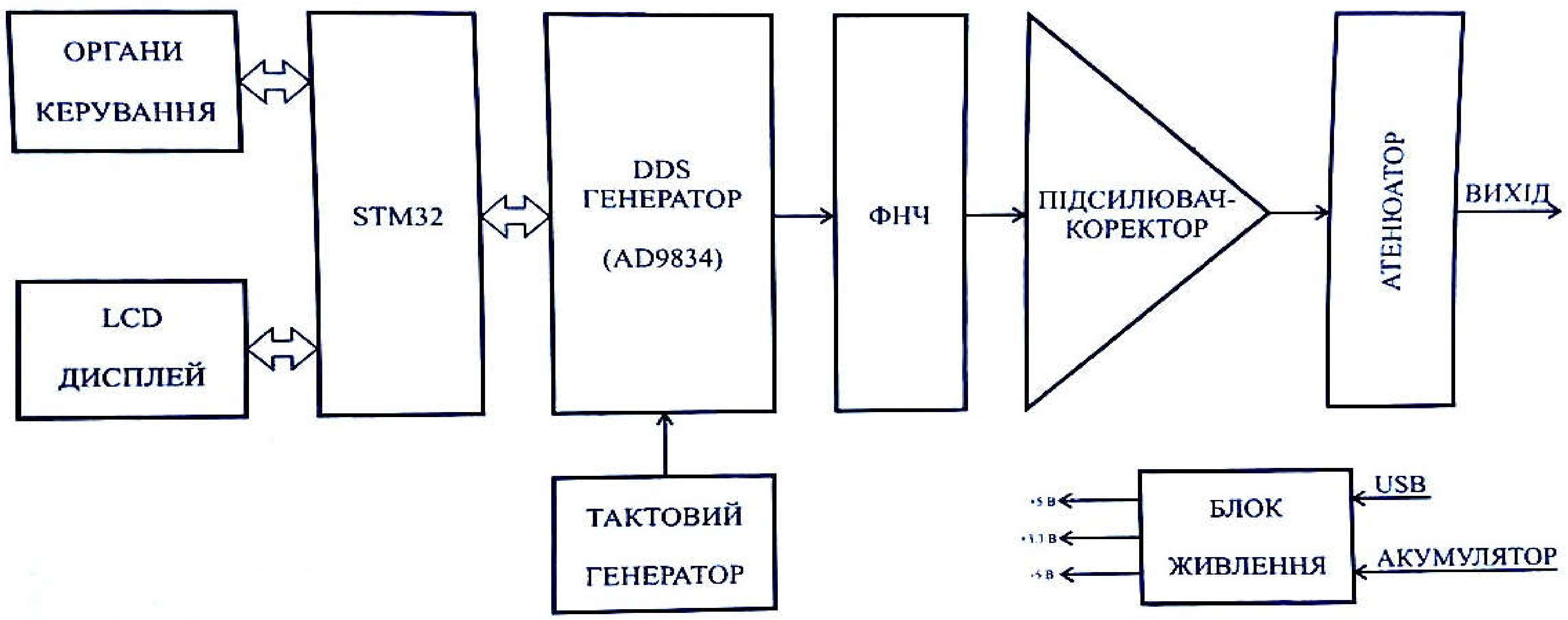


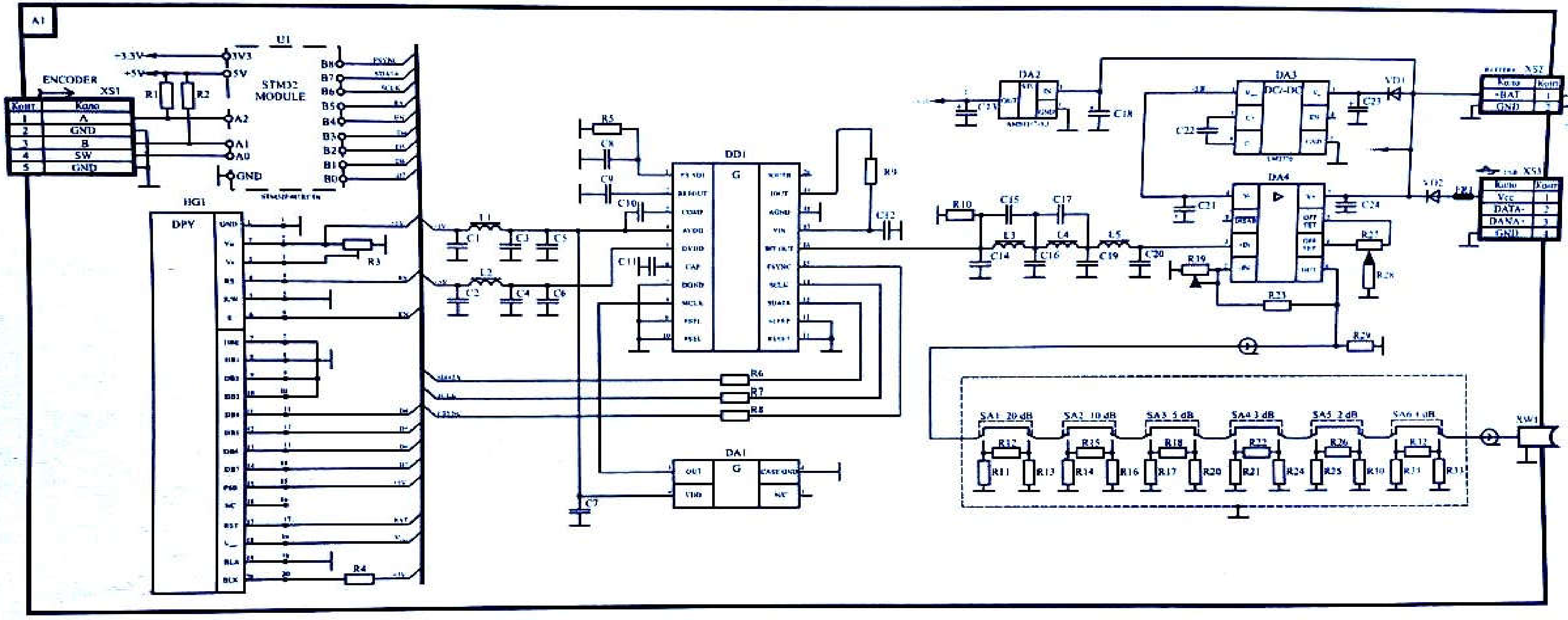
Рисунок 2.4 – Графічний LCD дисплей 128x64 LCD12864Z,

синій колір світіння з графічним процесором ST7920

КПЕК.023029.01.02 Е1



Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	КПЕК.023029.01.02 Е1		
Розробив		Зубахін В. В.		29.05	Програмований генератор сигналів на базі STM32 Схема електрична структурна	Літера / Маса / Масштаб	
Перевірив		Стецюк В. І.		2.06.25		Аркуш 80	Аркушів 1
Н.контроль		Стецюк В. І.		2.06.25		ХНУ, гр. ЕКРс-23-1	
Затвердив		Підченко С. К.		4.06.25			



					КПЕК.023029.01.02 Е3
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Програмований генератор сигналів на базі STM32
Розробив		Зубахін В. В.	В. Зубахін	29.05	
Перевірив		Стецюк В. І.	[signature]	2.06.26	Схема електрична принципова
Н.контроль		Стецюк В. І.	[signature]	2.06.26	ХНУ, гр. ЕКРс-23-1
Затвердив		Підченко С. К.	[signature]	14.06.26	

Літера	Маса	Масштаб

Лист 81	Листів 1

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Зубахін Владислав Володимирович

ПРОГРАМОВАНИЙ ГЕНЕРАТОР СИГНАЛІВ НА БАЗІ STM32

Спеціальність: 172 “Електронні комунікації та радіотехніка”

Освітня програма: «Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»

Керівник проєкту – к.т.н., доцент, Стецюк В. І.

Хмельницький, 2026 р.

МЕТА ПРОЄКТУ

Метою роботи є розробка програмованого генератора сигналів на базі мікроконтролера STM32 і DDS-синтезатора, який забезпечує формування сигналів різної форми з можливістю програмного керування їх параметрами.

Об’єкт та предмет дослідження

Об’єктом дослідження є процес формування електричних сигналів за допомогою цифрових методів синтезу.

Предметом дослідження є програмований генератор сигналів, побудований на основі мікроконтролера STM32 та DDS-синтезатора.

ОСНОВНІ ЗАВДАННЯМ КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ

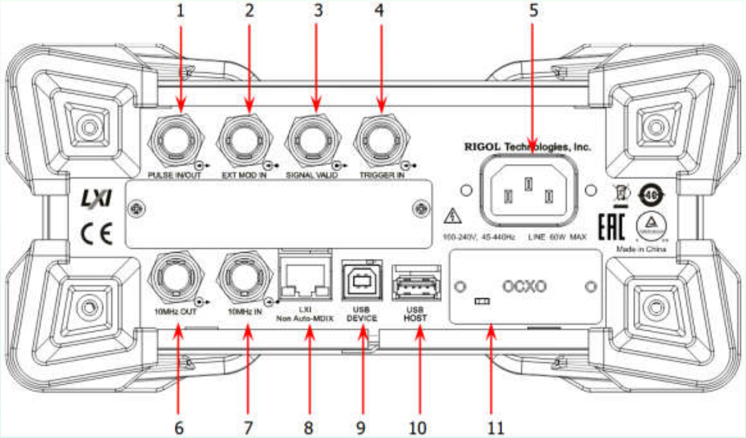
1. **Здійснити аналітичний огляд і аналіз за темою кваліфікаційного проєкту.**
2. **Розробити структурну схему пристрою.**
3. **Розробити принципову схему пристрою.**
4. **Сформувати висновки.**

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ МІСТИТЬ

1. **Текстову документацію:**
   - пояснювальна записка (3 розділи) – 80 арк.;
2. **Графічну документацію (креслення, плакати) - 4 арк.**

ВИБІР ПРИСТРОЮ-ПРОТОТИПУ

Рисунок 3.1 – Високочастотний генератор сигналів RIGOL DSG815



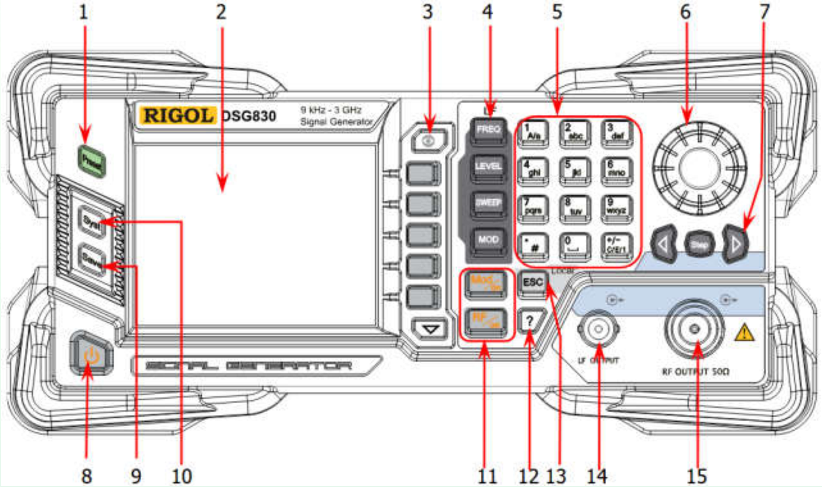


Рисунок 3.2– Задня панель генератора сигналів RIGOL DSG815:
1 – роз'єм входу/виходу імпульсного сигналу; 2 – вхідний роз'єм зовнішньої модуляції; 3 – роз'єм вихідного сигналу синхронізації; 4 – вхідний роз'єм зовнішнього тригера; 5 – роз’єм живлення ~220 В; 6 – вихідний роз'єм опорного сигналу; 7 – вхідний роз'єм опорного сигналу; 8 – LAN роз’єм; 9 – USB типу B; 10 – USB типу A; 11 – джерело опорного сигналу (OCXO)

Рисунок 3.3 – Органи управляння генератора сигналів високочастотного генератора сигналів RIGOL DSG815:
1 – кнопка «Скидання»; 2 – LCD дисплей; 3 – кнопка «Меню»; 4 – функціональні кнопки; 5 – локальна клавіатура; 6 – енкодер регулювання; 7 – кнопки напрямку/кроків; 8 – вимикач живлення; 9 – кнопка збереження та повторного виклику; 10 – кнопка налаштувань системи; 11 – кнопка керування виходом; 12 – вбудована система довідки; 13 – кнопка «ESC»; 14 – вихідний роз'єм НЧ; 15 – вихідний роз'єм ВЧ

ПЛАТФОРМА РОЗРОБКИ

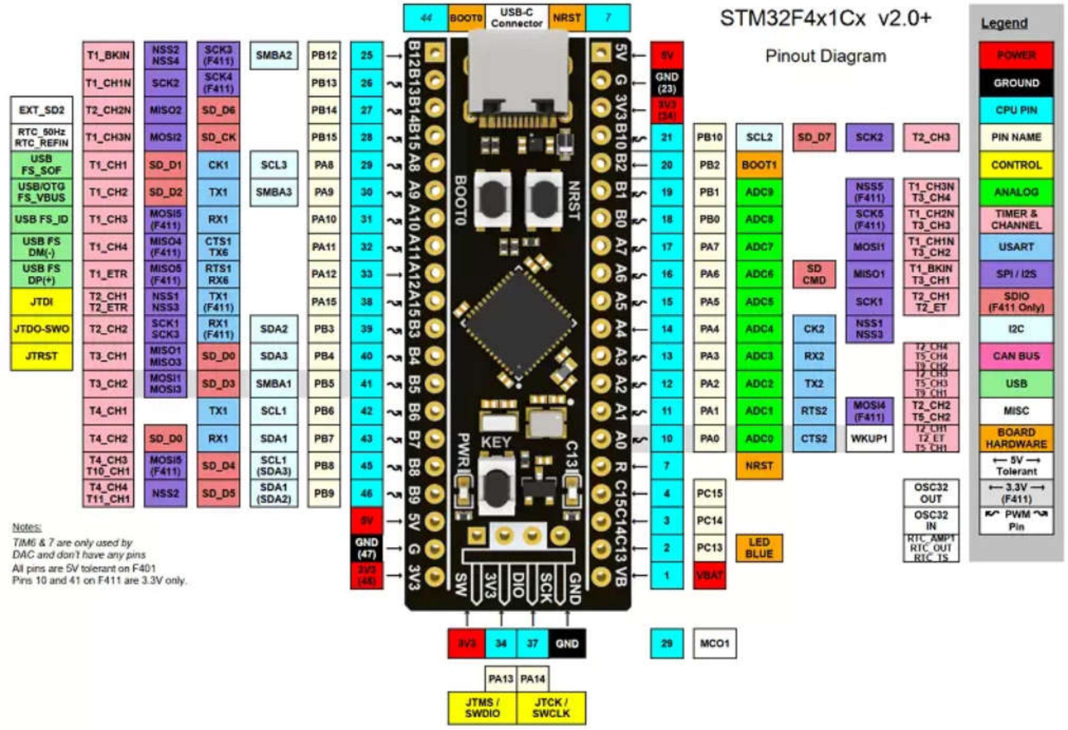


Рисунок 4.1 – Модуль STM32
на базі мікроконтролера STM32F401RCT6

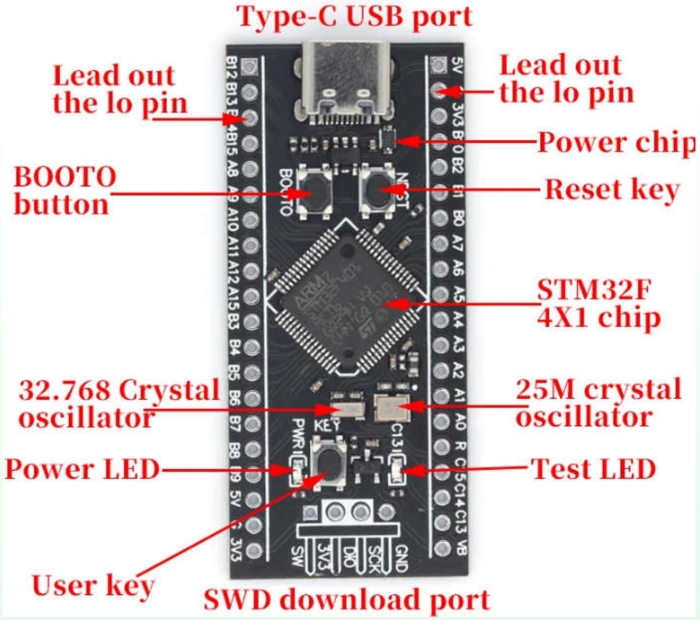
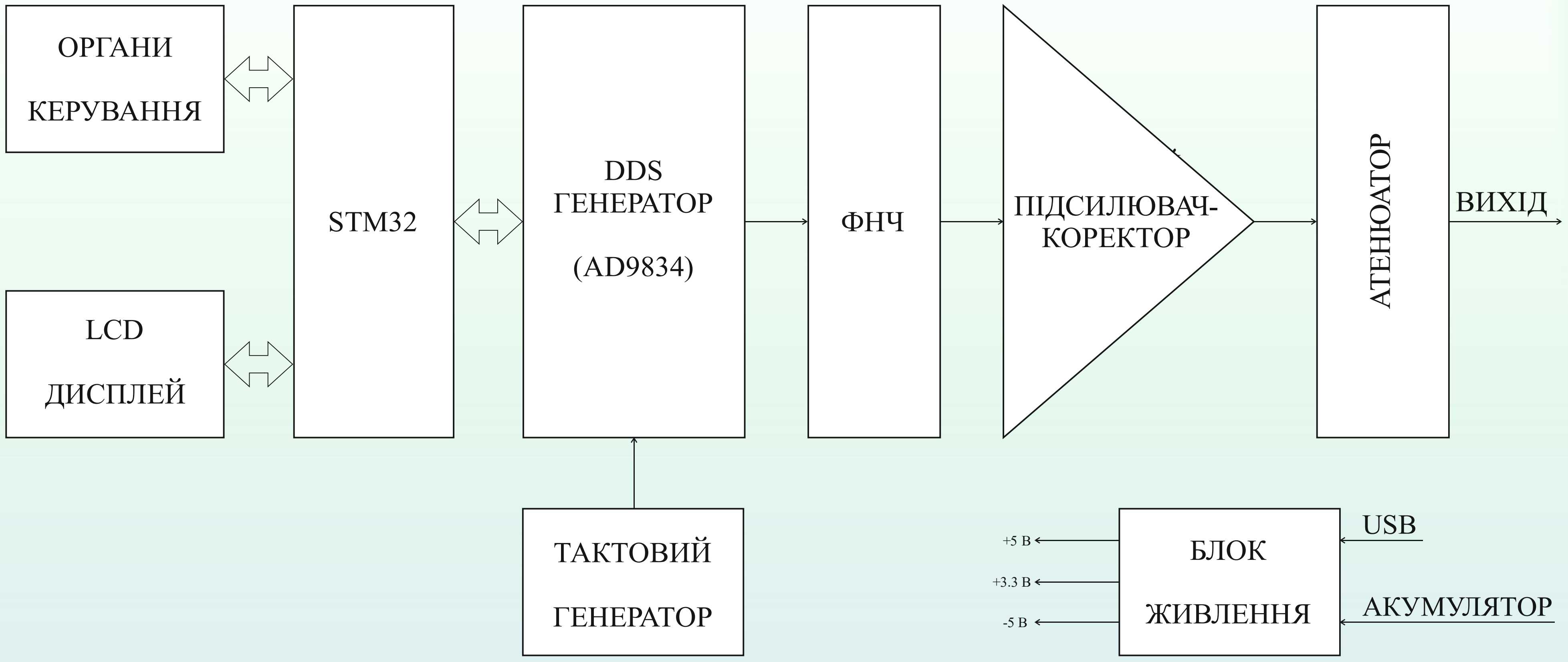


Рисунок 4.2 – Склад модуля STM32:

- зліва і справа виводи для під’єднання;
- кнопка BOOT – для програмування;
- кнопка Reset – для скидання;
- чіп STM32F401RCT6;
- кварцовий резонатор 32,768 кГц (часовий);
- кварцовий резонатор 25 МГц (тактовий);
- світлова індикація (живлення і тест);
- кнопка User Key – для тестування та взаємодії з програмою.
- роз’єм SWD (Serial Wire Debug) – двохпровідний інтерфейс
- для програмування та відладки.

СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРНА ПРОГРАМОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛІВ НА БАЗІ STM32



6.1

СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА ПРОГРАМОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛІВ НА БАЗІ STM32

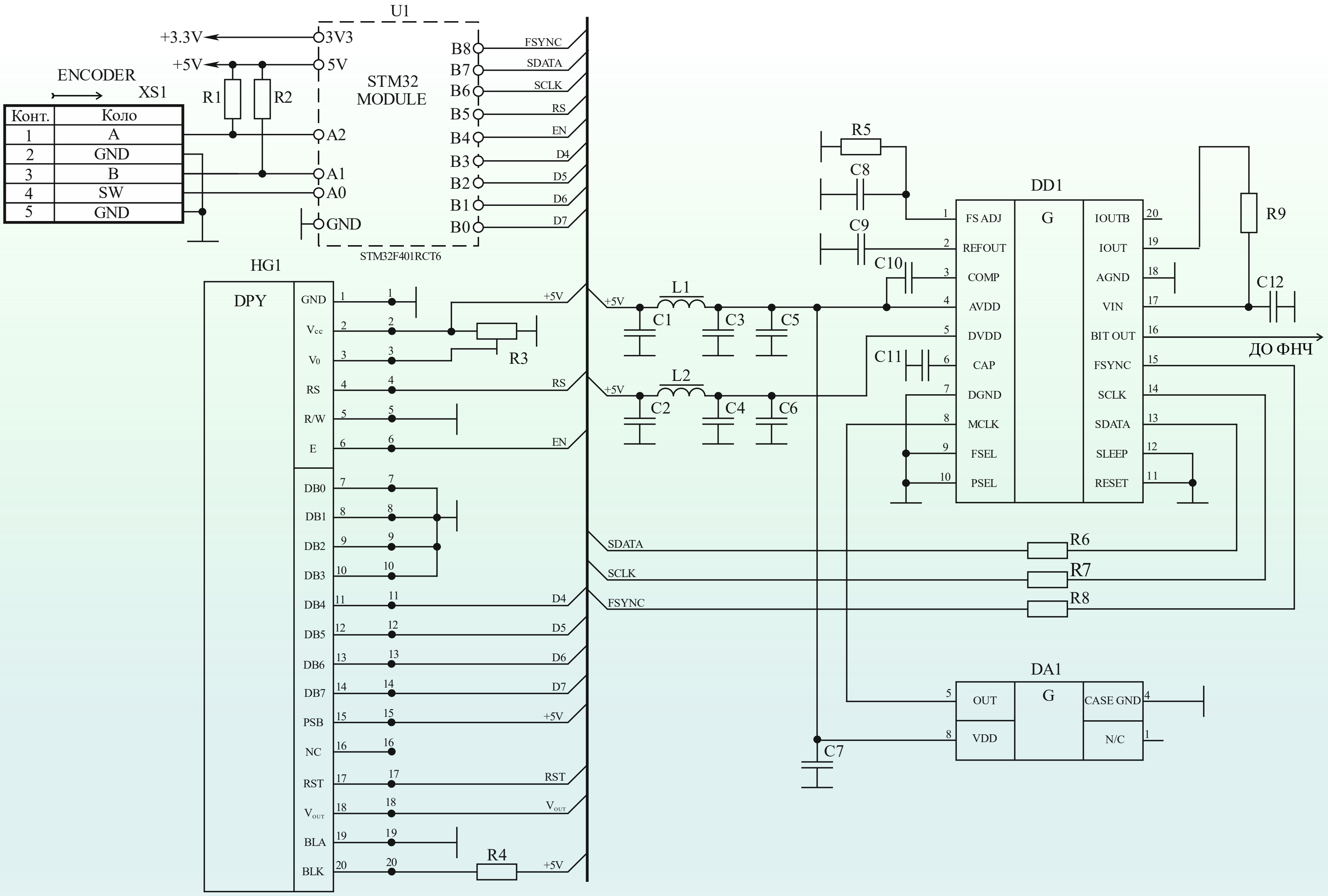
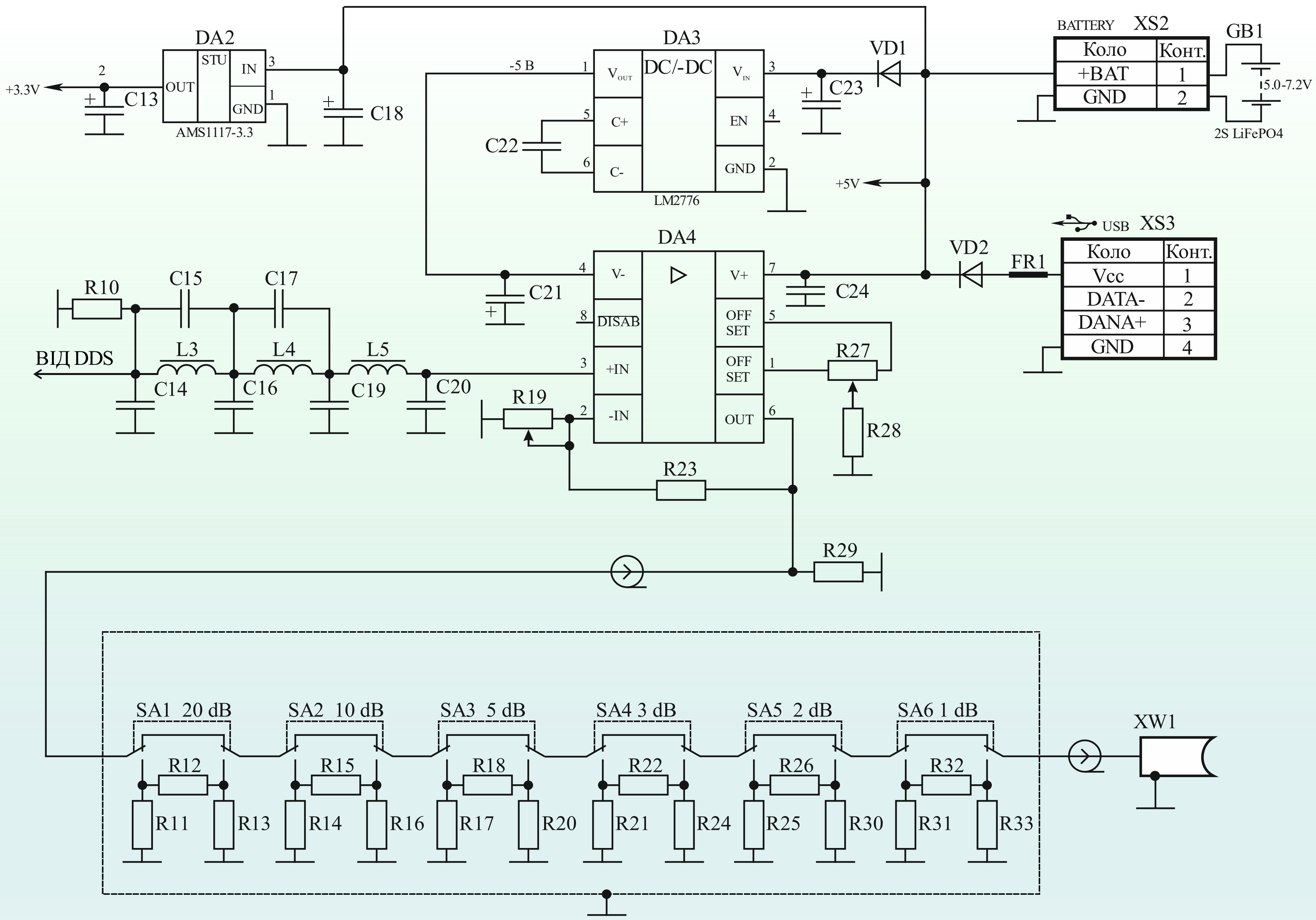


СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА ПРОГРАМОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛІВ НА БАЗІ STM32



ПРОГРАМНІ РЕЗУЛЬТАТИ

МОДУЛЬ РОБОТИ З ЕНКОДЕРОМ

```c
extern TIM_HandleTypeDef htim3;

void Encoder_Init(void)
{
    HAL_TIM_Encoder_Start(&htim3,
                          TIM_CHANNEL_ALL);
}
```

```c
int16_t Encoder_GetCount(void)
{
    return (int16_t)__HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim3);
}
```

```c
int8_t Encoder_GetStep(void)
{
    int16_t cnt = (int16_t)__HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim3);
    int16_t diff = cnt - old_cnt;

    if(diff >= 4)
    {
        old_cnt = cnt;
        return +1;
    }

    if(diff <= -4)
    {
        old_cnt = cnt;
        return -1;
    }

    return 0;
}
```

МОДУЛЬ РОБОТИ З ГРАФІЧНИМ ДИСПЛЕЄМ

```c
#ifndef __LCD12864_H
#define __LCD12864_H

#include "stm32f4xx_hal.h"

void LCD_Init(void);
void LCD_Clear(void);
void LCD_GotoXY(uint8_t row, uint8_t col);
void LCD_Print(char *str);

#endif
```

lcd12864.c:

```c
#include "lcd12864.h"

#define LCD_RS_GPIO GPIOB
#define LCD_RW_GPIO GPIOB
#define LCD_E_GPIO  GPIOB
#define LCD_RST_GPIO GPIOB

#define LCD_RS_PIN GPIO_PIN_0
#define LCD_RW_PIN GPIO_PIN_1
#define LCD_E_PIN  GPIO_PIN_2
#define LCD_RST_PIN GPIO_PIN_10

#define LCD_DATA_GPIO GPIOC

static void LCD_EnablePulse(void)
{
  HAL_GPIO_WritePin(LCD_E_GPIO, LCD_E_PIN,
GPIO_PIN_SET);
  HAL_Delay(1);
   HAL_GPIO_WritePin(LCD_E_GPIO, LCD_E_PIN,
           GPIO_PIN_RESET);
}

static void LCD_WriteBus(uint8_t data)
{
  LCD_DATA_GPIO->ODR =
     (LCD_DATA_GPIO->ODR & 0xFF00) | data;
}

static void LCD_WriteCmd(uint8_t cmd)
{
  HAL_GPIO_WritePin(LCD_RS_GPIO, LCD_RS_PIN,
GPIO_PIN_RESET);
  HAL_GPIO_WritePin(LCD_RW_GPIO, LCD_RW_PIN,
GPIO_PIN_RESET);

  LCD_WriteBus(cmd);
  LCD_EnablePulse();

  HAL_Delay(2);
}

static void LCD_WriteData(uint8_t data)
{
  HAL_GPIO_WritePin(LCD_RS_GPIO, LCD_RS_PIN,
GPIO_PIN_SET);
  HAL_GPIO_WritePin(LCD_RW_GPIO, LCD_RW_PIN,
GPIO_PIN_RESET);

  LCD_WriteBus(data);
  LCD_EnablePulse();

  HAL_Delay(1);
}

void LCD_Clear(void)
{
  LCD_WriteCmd(0x01);
  HAL_Delay(5);
}

void LCD_GotoXY(uint8_t row, uint8_t col)
{
  uint8_t addr;

  switch(row)
  {
    case 0: addr = 0x80 + col; break;
    case 1: addr = 0x90 + col; break;
    case 2: addr = 0x88 + col; break;
    case 3: addr = 0x98 + col; break;
    default: return;
  }
```

ВИСНОВКИ

1. В роботі приведена класифікація генераторів сигналів за формою вихідного сигналу, за частотним діапазоном, за принципом дії та схемотехнікою, за призначенням, за типом модуляції та брано та проаналізовано пристрій-прототип.

2. Проведене техніко-економічне обґрунтування, доведено оптимальність платформи на базі STM32 і DDS-синтезатора. Використання цифрового синтезу сигналів дозволяє отримати високі технічні характеристики при відносно невеликих витратах на реалізацію. Економічні розрахунки підтверджують ефективність проєкту та перспективність його подальшого впровадження. Розроблений пристрій вийшов конкурентоспроможним. Розроблено схему електричну структурну, яка містить наступні функціональні складові: платформа розробника (STM32), органи керування, LCD дисплей, DDS генератор, тактовий генератор, фільтр нижніх частот (ФНЧ), підсилювач-коректор, атенюатор і блок живлення.

3. Згідно технічного завдання, спроєктовано схему електричну принципову програмованого генератора сигналів на базі STM32 з мікроконтролером STM32F401RCT6. Пристрій одержав наступні технічні характеристики:

- форма сигналу: синусоїда, прямокутна, трикутна, білий шум;
- діапазон частот: 0...37,5 МГц;
- розрізнювальна здатність: 0,28 Гц;
- амплітуда вихідного сигналу: -5…0...5 В (з регулюванням зміщення відносно “0”);
- атенюатор: 0; -1 dB, -2 dB, -3 dB, -5 dB, -10 dB, -20 dB;
- стабільність частоти: $\pm 10 \cdot 10^{-6}$;
- вихідний опір: 50 Ω;
- графічний дисплей 128x64;
- керування за допомогою енкодера з фіксуючою кнопкою.

Завідувачу кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)
Сергію ПІДЧЕНКО
здобувача вищої освіти
студента 3 курсу, гр. ЕКРс-23-1
Зубахіна Владислава Володимировича

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання спеціалізованих програмних засобів StrikePlagiarism AntiPlagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений.

Надаю університету право на передачу мого кваліфікаційного проєкту для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для визначення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку та збереження мого кваліфікаційного проєкту "Програмований генератор на базі STM32" в репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія мого кваліфікаційного проєкту збігається (ідентична) з друкованою.

05.06.2026 р. Зубахін В. В.

Anti-Plagiarism (http://ap.km.ua) v-16.718

Максимальне співпадіння з одним документом 5.0%

Словники перевірки: UA, US, RU. **Помилок в документах: 14%**

ID: 274671 Назва: Програмований генератор сигналів на базі STM32 Додано в БД: 2026-06-11 Автора: Зубахін Владислав Володимирович Керівники: Стецюк Віктор Іванович Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	73959	666	4596 (6%)	48 (7%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Владислав ЗУБАХІН_ЕКРс-23-1

Співавтор:

Назва: Програмований генератор сигналів на базі STM32

Науковий керівник: Віктор СТЕЦЮК, к.т.н., доц

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:8.25%

Коефіцієнт подібності 2:2.97%

Мікропробіли: 282

Заміна букв: 12

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-11 23:42:04.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ **Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.**

☐ **Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.**

☐ **Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.**

Обгрунтування:

Дата 11.06.2026 р.

експерт [signature] Стецюк В.І.

ВІДГУК

на кваліфікаційний проект

"Програмований генератор сигналів на базі STM32"

студента Зубахіна Владислава Володимировича

Кваліфікаційний проект "Програмований генератор сигналів на базі STM32" присвячений розробці лабораторного генераторного обладнання.

Проект складається з трьох основних розділів.

На основі аналітичного огляду літературних джерел та патентних матеріалів, аналізу існуючих вітчизняних та зарубіжних аналогів, обґрунтовано вибір пристрою-прототипу.

У відповідності до технічного завдання, специфіки експлуатації, розроблена структурна схема пристрою та проведено її техніко-економічне обґрунтування.

У кваліфікаційному проекті розроблено схему електричну структурну та схему електричну принципову. Використовується сучасна елементна база та потужна платформа розробника STM32. Однією із особливостей розробки є використання методу прямого цифрового синтезу DDS для формування сигналів різноманітних форм: синусоїдального, прямокутного, трикутного і шумового.

Проект містить всі потрібні розділи основного і додаткового призначення, графічну частину. Все виконано з дотриманням правил оформлення конструкторської документації.

Результати дозволяють зробити висновок, що студент Зубахін В. В. має достатні знання по загальнотехнічним та спеціальним дисциплінам, вміє використовувати ці знання для рішення конкретних інженерних задач.

В цілому дипломний проект заслуговує оцінки "добре", а студент Зубахін В. В. присвоєння освітньої кваліфікації бакалавра за спеціальністю 172 – "Електронні комунікації та радіотехніка".

Керівник кваліфікаційного проекту В. І. Стецюк

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційний проект студента Зубахіна Владислава Володимировича

"ПРОГРАМОВАНИЙ ГЕНЕРАТОР СИГНАЛІВ НА БАЗІ STM32"

Пояснювальна записка складається з трьох основних розділів. В цілому проект містить 90 сторінок, 33 рисунки, 4 таблиці, 18 джерел посилань. Графічна частина складається із 2 плакатів, 2 креслень та 9 слайдів презентації.

Перевагами даного кваліфікаційного проєкту є актуальність, широкий попит в радіотехнічній та аматорській галузі. Дана розробка відноситься до лабораторного генераторного обладнання та приладобудування. Проєкт містить всі необхідні складові графічної частини і пояснювальної записки.

До особливостей розробки слід віднести простоту, використання широковживаної номенклатури електрорадіоелементів, наявність потужної платформи розробника STM32 і синтезатора прямого синтезу DDS. Розробка має реальний потенціал до практичного впровадження та подальшої комерціалізації у дрібносерійному виробництві.

Загалом кваліфікаційний проект повністю відповідає вимогам до випускових кваліфікаційних робіт бакалаврів та заслуговує на оцінку "ДОБРЕ".

Рецензент: ____________ Ю. Клеоц

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Назва кваліфікаційного проєкту: *Програмований генератор сигналів на базі STM32*
Автор: *Зубахін Владислав Володимирович*
Освітня програма *Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі*
Рівень вищої освіти: *перший (бакалаврський)*
Спеціальність *172* "Електронні комунікації та радіотехніка"
Керівник кваліфікаційного проєкту: *к. т. н., доцент Стецюк Віктор Іванович*

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом (ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	Відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	–
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	–
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	–
2	Інші види порушень академічної доброчесності	–

Підтвердження:
Виявлені запозичення не являються академічним плагіатом, а являються загальноприйнятими термінами, визначеннями і технічними поняттями. Коефіцієнти подібності складають 8,25% і 2,97%, а також мають посилання на приведений перелік літературних джерел.

"11" червня 2026 р.

Завідувач кафедри	Підпис	Сергій ПІДЧЕНКО Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Гарант освітньої програми	Підпис	Олег Пивовар Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник кваліфікаційної роботи	Підпис	Віктор Стецюк Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

Направляється студент Зубахін Владислав Володимирович на захист кваліфікаційної роботи
(прізвище, ім'я, по батькові)

за спеціальністю 172 - Електронні комунікації та радіотехніка

На тему: Програмований генератор сигналів на базі STM32

Кваліфікаційна робота, рецензія і довідка про перевірку на академічні запозичення додаються.

В.О. Декан факультету ________ (підпис) Сергій Лисенко (ім'я, прізвище)

ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

Зубахін В.В. з 2023 по 2026 роки повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за:
національною шкалою: відмінно 4,17 %, добре 37,50 %, задовільно 58,33 %.
шкалою ЄКТС: А 4,17 %, В 16,67 %, С 20,83 %, D 29,17 %, Е 29,17 %.

Методист факультету ________ (підпис) Галина Когут (ім'я, прізвище)

ВИСНОВОК КЕРІВНИКА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент Зубахін В. програму кваліфікаційного проектування виконав у повному об'ємі. Студент зарекомендував себе з позитивної сторони, дисциплінований. Графічна документація відповідає вимогам до ЄСКД. Пояснювальна записка оформлена згідно вимог, містить всі необхідні елементи. До захисту допускається.

Оцінка кваліфікаційної роботи „Добре"

Керівник кваліфікаційної роботи ________ (підпис) Віктор СТЕЦЮК (ім'я, прізвище)

"2" червня 2026 р.

ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кваліфікаційну роботу розглянуто. Студент Зубахін В.В. допускається до її захисту на екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри ТМІТ
(назва)

________ /Піддубко О.К./
(підпис, ім'я, прізвище)

„11" червня 2026 р.