

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
системи та технології в приладобудуванні»**

**зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»**

**на тему: «Автоматизована ультразвукова система регенерації шкіри
обличчя»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПК-41мп
Кузюк Данило Вікторович _____

Науковий керівник:

К.т.н. доцент
Баженов Віктор Григорович _____

Консультант з розробки сартап проекту:

Д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

с.н.с. каф. КІТВП, к.т.н., доцент
Ключко Тетяна Реджинальдівна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Кузюк Данило Вікторович

1. Тема дисертації **«Автоматизована ультразвукова система регенерації шкіри обличчя»**, науковий керівник дисертації Баженов Віктор Григорович, к.т.н. доцент, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації:

3. Об'єкт дослідження: процес цифрової генерації та спектрального перетворення ультразвукових сигналів для медичного застосування.

4. Вихідні дані: цільовий частотний діапазон генерації, форма вихідного сигналу, апаратна платформа керування, частота дискретизації ЦАП.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Провести аналіз літературних джерел щодо методів ультразвукової терапії та існуючих схемотехнічних рішень генераторів сигналів.
2. Виконати математичне моделювання цифрового синтезу сигналу форми Sinc та дослідити вплив дискретизації на його спектр.
3. Обґрунтувати вибір елементної бази та розробити структурну схему автоматизованої системи.

4. Виконати розрахунок параметрів вихідного каскаду, зокрема узгодження імпедансу драйвера з ємнісним навантаженням.
 5. Розробити стартап-проект для комерціалізації системи, включаючи маркетингову стратегію та оцінку економічної ефективності.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
1. Результати математичного моделювання спектральних характеристик сигналу Sinc (часові та частотні діаграми).
 2. Функціональна блок-схема системи прямого цифрового синтезу.
 3. Принципова електрична схема основних вузлів.
 4. Топологія друкованої плати та її 3D-модель.
 5. Економічні показники стартап-проекту.
 6. Презентація.
7. Орієнтовний перелік публікацій
8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 5 розробка стартап-проекту «DermaSinc»	Бояринова Катерина Олександрівна д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання	Примітка
1	Отримання та уточнення завдання, аналіз літератури		
2	Розробка структурної схеми системи та вибір елементної бази		
3	Розробка електричної схеми сенсорного вузла		
4	Математичне моделювання ефективності системи (ТМО)		
5	Розробка алгоритмів та структури бази даних		
6	Написання розділу «Охорона праці» / або іншого спецрозділу		
7	Розробка стартап-проекту		
8	Оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів		
9	Попередній захист на кафедрі		

Студент

Данило КУЗЮК

Науковий керівник

Віктор БАЖЕНОВ

РЕФЕРАТ

У магістерській дисертації розроблена та досліджена автоматизована ультразвукова система регенерації шкіри на базі цифрової генерації ультразвукового сигналу форми Sinc. Робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі створення компактного, енергоефективного та доступного медичного обладнання для дерматології та естетичної медицини.

Актуальність теми магістерської дисертації обумовлена стрімким розвитком методів неінвазивної терапії, серед яких ультразвукова дія займає провідне місце завдяки своїй безпеці та доведеним ефективності стимуляції регенеративних процесів. Існуючі на ринку апарати для ультразвукової терапії переважно будуються на основі традиційної аналогової схемотехніки, що призводить до значних габаритів, високого енергоспоживання через низький коефіцієнт корисної дії вихідних каскадів та високої собівартості. Крім того, аналогові генератори мають обмежені можливості щодо гнучкого керування формою та спектральним складом сигналу, що знижує селективність терапевтичного впливу.

Запропонований у роботі підхід базується на концепції програмно-визначуваного ультразвуку та використанні сучасних мікроконтролерів для прямого цифрового синтезу сигналів. Використання ступінчастої апроксимації ідеального сигналу Sinc дозволяє сформувати випромінювання з чітко обмеженим прямокутним спектром, що забезпечує концентрацію енергії виключно у терапевтичному діапазоні частот. Такий метод дозволяє відмовитися від громіздких аналогових фільтрів та складних систем охолодження, замінивши їх програмними алгоритмами та простою цифровою логікою. Це відкриває шлях до створення портативних пристроїв, здатних конкурувати зі стаціонарним клінічним обладнанням.

Об'єктом дослідження є процес формування та спектрального перетворення ультразвукових сигналів складної форми в цифрових генераторах медичного призначення. Предметом дослідження є методи оптимізації параметрів ступінчастої апроксимації сигналу Sinc для забезпечення необхідної спектральної чистоти в умовах апаратних обмежень мікроконтролера.

Метою роботи є розробка та обґрунтування структури автоматизованої системи регенерації шкіри, яка забезпечує генерацію терапевтичного ультразвукового сигналу з заданими спектральними характеристиками при мінімізації апаратних витрат. Для досягнення мети вирішуються задачі математичного моделювання сигналів, аналізу впливу дискретизації на спектр, розробки схемотехнічних рішень та програмного забезпечення.

Методи дослідження базуються на теорії цифрової обробки сигналів, спектральному аналізі з використанням швидкого перетворення Фур'є та комп'ютерному моделюванні в середовищі MATLAB. У роботі проведено детальне дослідження впливу часової дискретизації та квантування за рівнем на спектральні характеристики вихідного сигналу. Зокрема, проаналізовано вплив асиметрії рівнів напруги вихідного драйвера та часових параметрів імпульсів на пригнічення позасмугових гармонік.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в обґрунтуванні можливості використання ступінчастої апроксимації сигналу Sinc з низькою розрядністю для формування високоякісного терапевтичного випромінювання. Доведено, що при використанні частоти оновлення цифро-аналогового перетворювача, яка значно перевищує верхню межу терапевтичної смуги, основна енергія сигналу зосереджується в робочій області, а паразитні спектральні складові зміщуються у високочастотну область, де вони ефективно пригнічуються природними властивостями

вихідного тракту та простими фільтрами. Запропоновано оптимальні параметри триімпульсної послідовності, що враховують обмеження дискретності часу сучасних мікроконтролерів.

Практичне значення роботи полягає у створенні макету та функціональної схеми пристрою, який може бути впроваджений у серійне виробництво. Розроблене рішення дозволяє знизити вартість компонентної бази, зменшити вагу та габарити приладу, а також забезпечити високу гнучкість налаштувань завдяки програмному керуванню параметрами генерації. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні новітніх зразків медичної техніки для косметології та дерматології.

Ключові слова:

УЛЬТРАЗВУКОВА ТЕРАПІЯ, ЦИФРОВИЙ СИНТЕЗ, SINC-СИГНАЛ, МІКРОКОНТРОЛЕР, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, РЕГЕНЕРАЦІЯ ШКІРИ, STM32.

ABSTRACT

In the master's thesis, an automated ultrasonic skin regeneration system based on the digital generation of an ultrasonic signal with a Sinc waveform was developed and investigated. The work is dedicated to solving the relevant scientific and technical task of creating compact, energy-efficient, and affordable medical equipment for dermatology and aesthetic medicine.

The relevance of the master's thesis topic is conditioned by the rapid development of non-invasive therapy methods, among which ultrasonic exposure occupies a leading position due to its safety and proven effectiveness in stimulating regenerative processes. Existing devices for ultrasonic therapy on the market are predominantly built on traditional analog circuitry, which leads to significant dimensions, high energy consumption due to the low efficiency of output stages, and high production costs. Furthermore, analog generators have limited capabilities regarding flexible control of the signal's shape and spectral composition, which reduces the selectivity of the therapeutic effect.

The approach proposed in the work is based on the concept of Software-Defined Ultrasound and the use of modern microcontrollers for direct digital synthesis of signals. The use of a stepped approximation of the ideal Sinc signal allows for forming radiation with a strictly limited rectangular spectrum, ensuring energy concentration exclusively within the therapeutic frequency range. This method allows for the elimination of bulky analog filters and complex cooling systems, replacing them with software algorithms and simple digital logic. This opens the way for creating portable devices capable of competing with stationary clinical equipment.

The object of the study is the process of formation and spectral transformation of complex ultrasonic signals in digital medical generators. The subject of the study is the methods of optimizing the parameters of the stepped

approximation of the Sinc signal to ensure the necessary spectral purity under the conditions of microcontroller hardware limitations.

The aim of the work is the development and justification of the structure of an automated skin regeneration system that provides the generation of a therapeutic ultrasonic signal with specified spectral characteristics while minimizing hardware costs. To achieve this goal, tasks of mathematical modeling of signals, analysis of the impact of discretization on the spectrum, and development of circuit solutions and software are solved.

The research methods are based on the theory of digital signal processing, spectral analysis using the Fast Fourier Transform (FFT), and computer modeling in MATLAB environment. The work conducts a detailed study of the influence of time discretization and level quantization on the spectral characteristics of the output signal. In particular, the influence of the asymmetry of the output driver voltage levels and the time parameters of the pulses on the suppression of out-of-band harmonics is analyzed.

The scientific novelty of the obtained results lies in substantiating the possibility of using a stepped approximation of the Sinc signal with low bit depth to form high-quality therapeutic radiation. It is proven that when using a digital-to-analog converter update frequency that significantly exceeds the upper limit of the therapeutic band, the main signal energy is concentrated in the working area, and parasitic spectral components are shifted to the high-frequency region, where they are effectively suppressed by the natural properties of the output path and simple filters. Optimal parameters for a three-pulse sequence, taking into account the time discreteness limitations of modern microcontrollers, are proposed.

The practical value of the work lies in the creation of a layout and functional diagram of a device that can be implemented in serial production. The developed solution allows for reducing the cost of the component base,

decreasing the weight and dimensions of the device, as well as providing high flexibility of settings due to software control of generation parameters. The research results can be used in the design of the latest samples of medical equipment for cosmetology and dermatology.

Keywords:

ULTRASOUND THERAPY, DIGITAL SYNTHESIS, SINC SIGNAL, MICROCONTROLLER, SPECTRAL ANALYSIS, SKIN REGENERATION, STM32.

Зміст

1 РОЗДІЛ 1: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	14
1.1 Біофізичні механізми впливу високочастотного ультразвуку на тканини шкіри	14
1.2 Аналіз існуючих комерційних рішень та їх недоліки	16
1.3 Обґрунтування вибору форми сигналу Sinc для селективного впливу	19
1.4 Проблематика традиційної аналогової схемотехніки генераторів	21
1.5 Переваги прямого цифрового синтезу на базі мікроконтролерів	22
1.6 Висновок 1 розділу	24
2 РОЗДІЛ 2: МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ	25
2.1 Методологія ступінчастої апроксимації Sinc(t) на STM32	25
2.2 Теоретичний спектральний аналіз: Вплив дискретизації та квантування	26
2.3 Доведення спектральної еквівалентності (Валідація гіпотези)	27
2.4 Спрощення аналогового фронт-енду (AFE) та переваги рішення	29
2.5 Моделювання сигналу	30
2.6 Висновок 2 розділу	32
3 РОЗДІЛ 3: РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	34
3.1 Аналіз часових обмежень цифрового синтезу сигналу	34
3.2 Розрахунок сталої часу RC-ланцюга навантаження	35
3.3 Узгодження вихідного опору драйвера HV7360	36
3.4 Висновок 3 розділу	39
4 РОЗДІЛ 4: ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ	40
4.1 Розробка принципової схеми	40
4.2 Розведення друкованої плати	50
4.3 3-Д модель друкованої плати	51
4.4 Висновок 4 розділу	52
5 РОЗДІЛ 5: РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗОВАНА УЛЬТРАЗВУКОВА СИСТЕМА РЕГЕНЕРАЦІЇ ШКІРИ ОБЛИЧЧЯ»	53
5.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту	53
5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	58
5.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту	67
5.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності	74
5.5 Висновок 5 розділу	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ВСТУП

Сучасна естетична медицина та дерматологія переживають етап стрімкого технологічного розвитку, де ключову роль відіграють апаратні методи впливу на тканини. Серед широкого спектра технологій ультразвукова терапія займає особливе місце завдяки своїй здатності стимулювати регенеративні процеси на клітинному рівні без порушення цілісності шкірних покривів. Статистика свідчить про постійне зростання попиту на неінвазивні процедури омолодження, що формує потребу в ефективному, безпечному та доступному обладнанні.

Найбільш поширеними методами сьогодні є використання фокусованого ультразвуку високої інтенсивності та мікрофокусованого ультразвуку. Механізм їхньої дії базується на створенні зон термічної коагуляції або механічної стимуляції фібробластів, що запускає синтез нового колагену та еластину. Проте ефективність цих процедур на пряму залежить від точності керування параметрами ультразвукового сигналу, зокрема його частотою та формою. Традиційно для генерації таких сигналів використовуються аналогові генератори та підсилювачі потужності класів АВ або D.

Однак аналогова схемотехніка має низку суттєвих недоліків, які стримують масове впровадження інновацій. Підсилювачі класу АВ, хоч і забезпечують високу лінійність сигналу, мають низький коефіцієнт корисної дії, що призводить до значного тепловиділення та необхідності використання масивних систем охолодження. Підсилювачі класу D, будучи більш енергоефективними, вносять значні спотворення у сигнал, що вимагає застосування складних і дорогих фільтрів. Це робить кінцеві пристрої габаритними, дорогими у виробництві та складними в обслуговуванні. Крім того, аналогові системи є жорстко прив'язаними до

компонентної бази, що ускладнює зміну параметрів лікування без фізичного втручання в конструкцію приладу.

Актуальність дослідження полягає у необхідності переходу до цифрових методів генерації ультразвукових сигналів, що дозволить створити нове покоління медичних приладів. Використання мікроконтролерів для прямого цифрового синтезу дозволяє програмно формувати сигнали складної форми, такі як Sinc-імпульс, який володіє ідеальними спектральними характеристиками для терапевтичних цілей. Такий підхід дозволяє відмовитися від дорогою вартісної аналогової бази, зменшити енергоспоживання та забезпечити можливість гнучкого налаштування параметрів процедури шляхом оновлення програмного забезпечення.

Об'єктом дослідження є процес цифрової генерації та спектрального перетворення ультразвукових сигналів для медичного застосування. Предметом дослідження є методи та алгоритми формування ступінчастої апроксимації сигналу Sinc за допомогою мікроконтролера STM32 для забезпечення ефективної регенерації тканин шкіри.

Основний метод дослідження полягає у математичному моделюванні та експериментальній верифікації спектральних характеристик сигналів. У цій магістерській роботі виконано аналіз вимог до терапевтичних ультразвукових сигналів та обґрунтовано вибір форми імпульсу Sinc. На основі моделювання визначено оптимальні параметри дискретизації та квантування, які дозволяють зберегти корисну енергію сигналу в терапевтичному діапазоні та мінімізувати рівень побічних випромінювань. Розроблено функціональну схему та алгоритми роботи цифрового генератора, що підтверджує можливість реалізації високоефективної системи на базі доступних мікроконтролерів.

Практична реалізація запропонованого підходу дозволить знизити собівартість обладнання, підвищити його мобільність та надійність, що зробить процедури ультразвукової регенерації доступнішими для широкого кола пацієнтів. Результати роботи можуть бути використані при розробці серійних зразків медичної техніки.

1 РОЗДІЛ 1: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Біофізичні механізми впливу високочастотного ультразвуку на тканини шкіри

Сучасна апаратна косметологія та дерматологія все частіше звертаються до методів, що дозволяють стимулювати природні регенеративні процеси організму без порушення цілісності шкірних покривів. Серед широкого спектра фізичних факторів, що використовуються з терапевтичною метою, особливе місце займає ультразвук високої частоти. На відміну від класичної фізіотерапії, що оперує частотами 1-3 МГц для прогріву м'язових тканин, сучасні методи регенерації шкіри використовують діапазон від 10 до 19 МГц. Цей вибір обумовлений необхідністю локалізації енергії в межах епідермісу та дерми, товщина яких зазвичай не перевищує кількох міліметрів. [1], [5]

Механізм впливу ультразвукових хвиль на біологічні тканини є комплексним і складається з термічного, механічного та фізико-хімічного компонентів (Рис. 1.1). Ключовим фактором, що визначає ефективність регенерації, є здатність акустичної хвилі впливати на позаклітинний матрикс та клітинні структури, зокрема фібробласти. Дослідження показують, що контрольований акустичний тиск здатний модулювати активність металопротеїназ (MMPs), які відповідають за деградацію колагену, а також стимулювати синтез білків теплового шоку (HSPs). Останні відіграють критичну роль у захисті клітин від стресу та запуску процесів відновлення білкових структур. [5], [18]

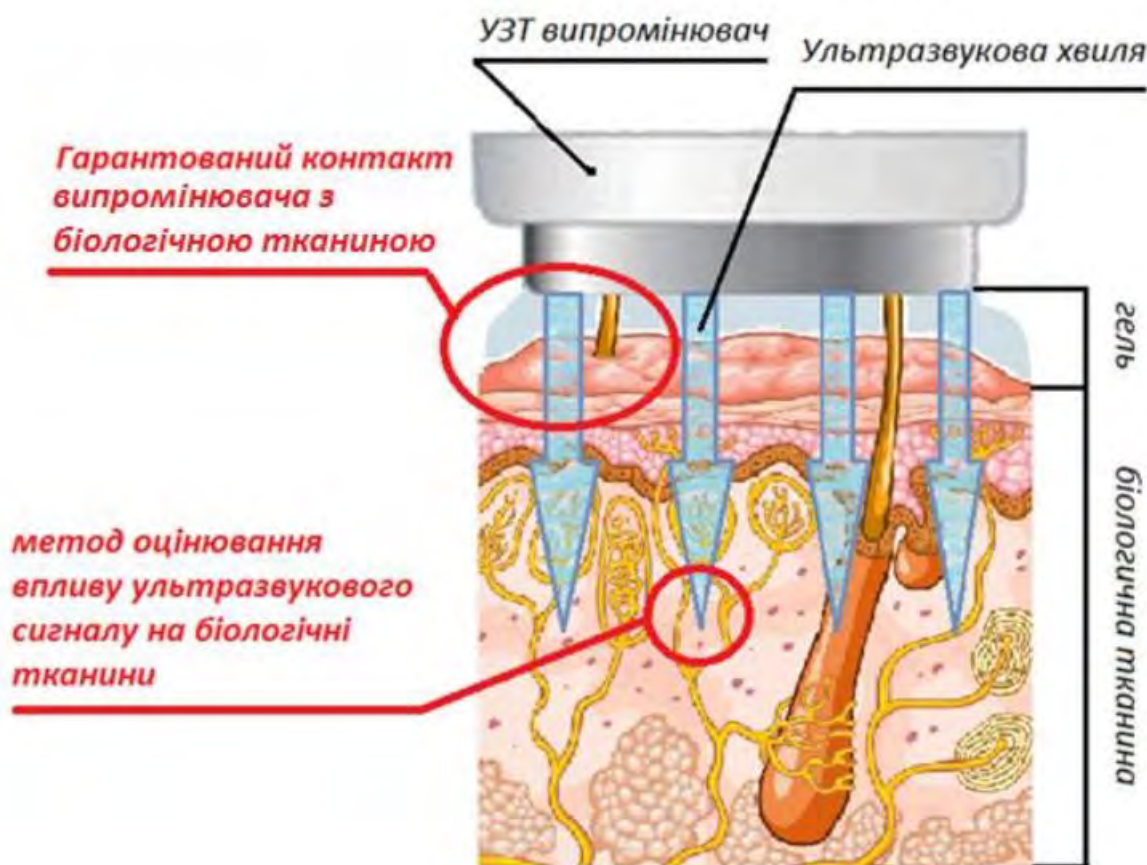


Рисунок 1.1 - Схема впливу ультразвуку на біологічні тканини

Глибина проникнення ультразвукової хвилі обернено пропорційна її частоті. Інтенсивність поглинання енергії середовищем описується експоненціальним законом:

$$I(x) = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (1)$$

де $I(x)$ — інтенсивність на глибині x , I_0 — початкова інтенсивність, а α — коефіцієнт загасання, який зростає зі збільшенням частоти. Використання частот близько 10 МГц дозволяє сконцентрувати енергію на глибині 0,3–0,5 см, що відповідає розташуванню дермального шару, де відбуваються основні процеси старіння. [6] Це забезпечує високу селективність впливу, мінімізуючи ризик пошкодження глибших структур, таких як кістки або великі судини, та дозволяє уникнути системного нагрівання тканин.

Окрім термічного ефекту, важливу роль відіграє мікромеханічний вплив, відомий як мікромасаж. Високочастотні коливання створюють змінні градієнти тиску, що змінюють проникність клітинних мембран та прискорюють дифузію метаболітів. Особливий інтерес представляє використання складних форм сигналу, які дозволяють досягти специфічного розподілу тиску в тканинах, що неможливо при використанні традиційних синусоїдальних хвиль.

1.2 Аналіз існуючих комерційних рішень та їх недоліки

Ринок медичного обладнання для ультразвукової терапії представлений низкою високотехнологічних пристроїв, аналіз яких дозволяє виявити основні тенденції та технічні проблеми галузі. Більшість існуючих систем базуються на аналогових методах генерації сигналу, що накладає певні обмеження на їх функціональність та масогабаритні показники.

Одним з лідерів ринку є технологія LDM (Local Dynamic Micromassage), реалізована в апаратах серії LDM-MED компанії Wellcomet (Рис. 1.2). Принцип дії цих пристроїв базується на швидкому перемиканні між двома частотами, наприклад, 3 МГц та 10 МГц. Така зміна частот створює динамічні градієнти тиску в тканинах, що посилює ефект мікромасажу. [5], [26]



Рисунок 1.2 - Зовнішній вигляд апарату LDM-MED

Незважаючи на високу клінічну ефективність, схемотехнічна реалізація таких систем є складною. Для генерації двох частот часто використовуються подвійні п'єзокерамічні перетворювачі або складні комутаційні схеми, що збільшує вартість випромінювача. Крім того, форма сигналу в таких пристроях зазвичай обмежена синусоїдою, що не дозволяє повною мірою керувати спектральним складом випромінювання.

Іншим поширеним класом пристроїв є системи мікрофокусованого ультразвуку (MFU-V), яскравим представником яких є апарат Ultherapy (Рис 1.3). Технологія базується на створенні точок термічної коагуляції на чітко заданій глибині (1.5 мм, 3.0 мм, 4.5 мм). Це досягається шляхом

фокусування ультразвукового пучка за допомогою акустичних лінз або фазованих решіток. [3], [15]

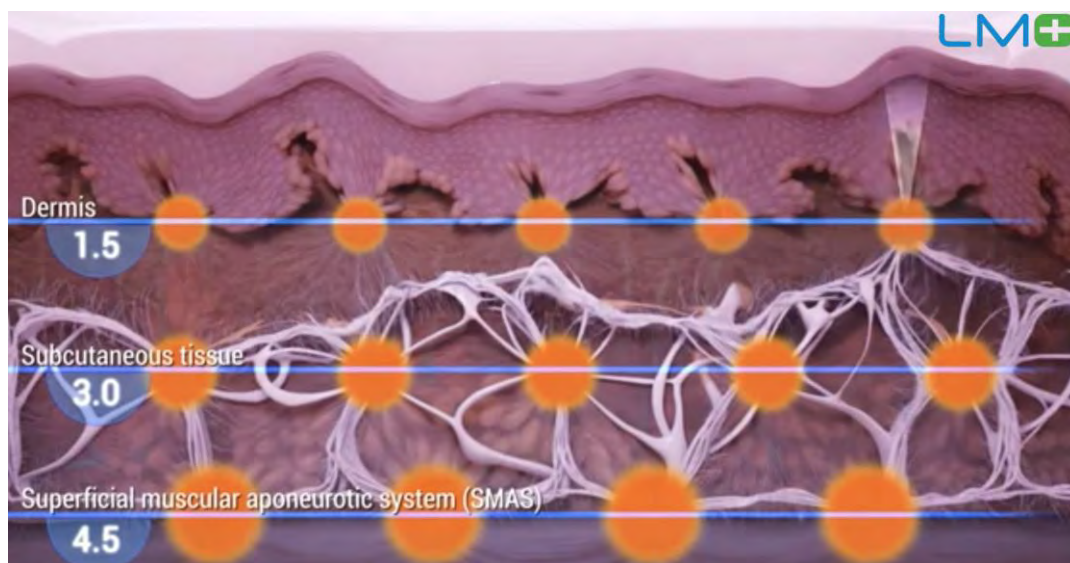


Рис. 1.3. Принцип формування точок коагуляції в системі Ultherapy

Недоліком таких систем є їх висока енергоємність та болючість процедури для пацієнта, що часто вимагає використання анестезії. З технічної точки зору, генерація потужних сфокусованих імпульсів потребує високовольтних джерел живлення та громіздких систем охолодження, що робить обладнання стаціонарним і дорогим.

Новітньою розробкою в цій галузі є технологія Sofwave (Рис 1.4), яка використовує паралельні ультразвукові промені для обробки середніх шарів дерми. Цей підхід дозволяє охопити більшу площу за один імпульс та зменшити час процедури. [16]

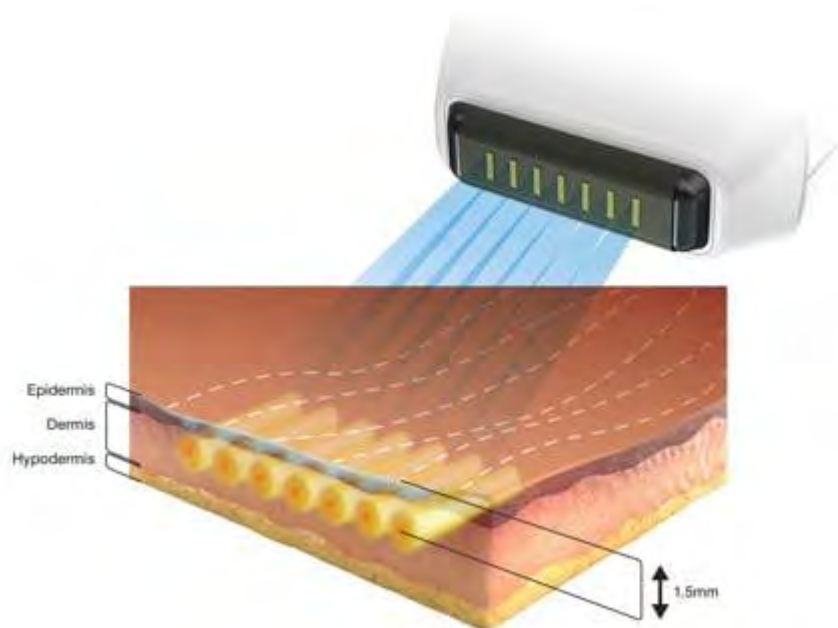


Рисунок 1.4 - Технологія паралельних променів у системі Sofwave

Спільним недоліком розглянутих аналогів є використання традиційної архітектури генераторів, побудованих на базі аналогових підсилювачів потужності. Це призводить до низького коефіцієнта корисної дії (ККД), значного тепловиділення та необхідності використання активного охолодження як для електронного блоку, так і для маніпули. Крім того, жорстка апаратна реалізація ускладнює модернізацію алгоритмів лікування без заміни фізичних компонентів пристрою.

1.3 Обґрунтування вибору форми сигналу Sinc для селективного впливу

Ключовою проблемою традиційних ультразвукових генераторів, що використовують синусоїдальні або прямокутні імпульси, є наявність широкого спектра побічних частот. Прямокутний імпульс у часовій області має спектр у вигляді функції $\text{sinc}(x)$, що теоретично простягається до нескінченності. Це означає, що значна частина енергії випромінюється на

гармоніках, які не беруть участі в корисному терапевтичному впливі, а лише призводять до паразитного нагрівання тканин та апаратури.

Для вирішення цієї проблеми доцільно використовувати підхід, зворотний до традиційного: генерувати сигнал, який у часовій області має форму функції Sinc (Рис 1.5). Практична реалізація такого підходу дозволяє досягти "спектральної чистоти" випромінювання. Це дає можливість впливати виключно на цільові структури шкіри, що мають резонансний відгук у вибраному діапазоні, не зачіпаючи сусідні тканини. Крім того, відсутність вищих гармонік дозволяє спростити вихідні фільтри генератора, оскільки немає необхідності пригнічувати потужні паразитні викиди, характерні для меандру або пилкоподібних сигналів. [13]

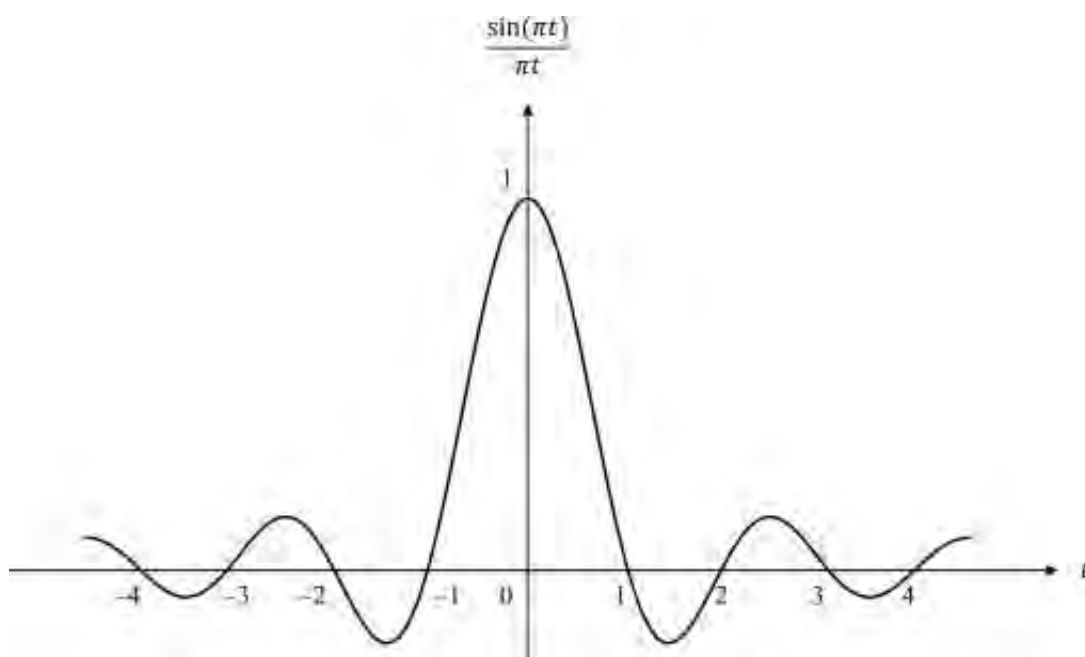


Рисунок 1.5 - Функція Sinc

Однак генерація ідеального Sinc-імпульсу в аналоговій схемотехніці є надзвичайно складним завданням, що вимагає прецизійних компонентів. Саме тому перехід до цифрового синтезу є найбільш перспективним напрямком розвитку.

1.4 Проблематика традиційної аналогової схемотехніки генераторів

Класична схема побудови ультразвукового генератора включає задаючий генератор, попередній підсилювач та вихідний каскад підсилення потужності. Вибір класу підсилювача завжди є компромісом між якістю сигналу та енергоефективністю.

Підсилювачі класу А та АВ забезпечують високу лінійність та малі спотворення форми сигналу, що важливо для медичних застосувань. Проте їх теоретичний ККД не перевищує 78,5%, а на практиці, при роботі на комплексне навантаження (яким є п'єзокерамічний випромінювач), він часто падає до 40-50%. Втрачена енергія виділяється у вигляді тепла на транзисторах вихідного каскаду.

Значне тепловиділення вимагає використання масивних радіаторів та вентиляторів, що збільшує габарити пристрою та унеможливорює створення портативних рішень з автономним живленням.

Альтернативою є використання підсилювачів класу D, які працюють у ключовому режимі та мають ККД понад 90%. Однак принцип їх роботи базується на широтно-імпульсній модуляції (ШІМ), що неминуче вносить у спектр сигналу високочастотні комутаційні завади та гармоніки. Для їх фільтрації необхідні громіздкі LC-фільтри високого порядку. Крім того, класичні підсилювачі класу D погано справляються з відтворенням складних обвідних сигналу, таких як Sinc-імпульс, оскільки вони оптимізовані для роботи з постійною амплітудою або простими синусоїдами.

Таким чином, існує науково-технічна проблема створення генератора, який поєднував би спектральну чистоту лінійних підсилювачів з енергоефективністю ключових схем.

1.5 Переваги прямого цифрового синтезу на базі мікроконтролерів

Розв'язання описаних вище проблем лежить у площині переходу від аналогової обробки сигналів до цифрової. Технологія прямого цифрового синтезу (DDS - Direct Digital Synthesis) дозволяє генерувати сигнали довільної форми шляхом зчитування послідовності числових значень з таблиці та перетворення їх у напругу за допомогою цифро-аналогового перетворювача (Рис 1.6). [14]

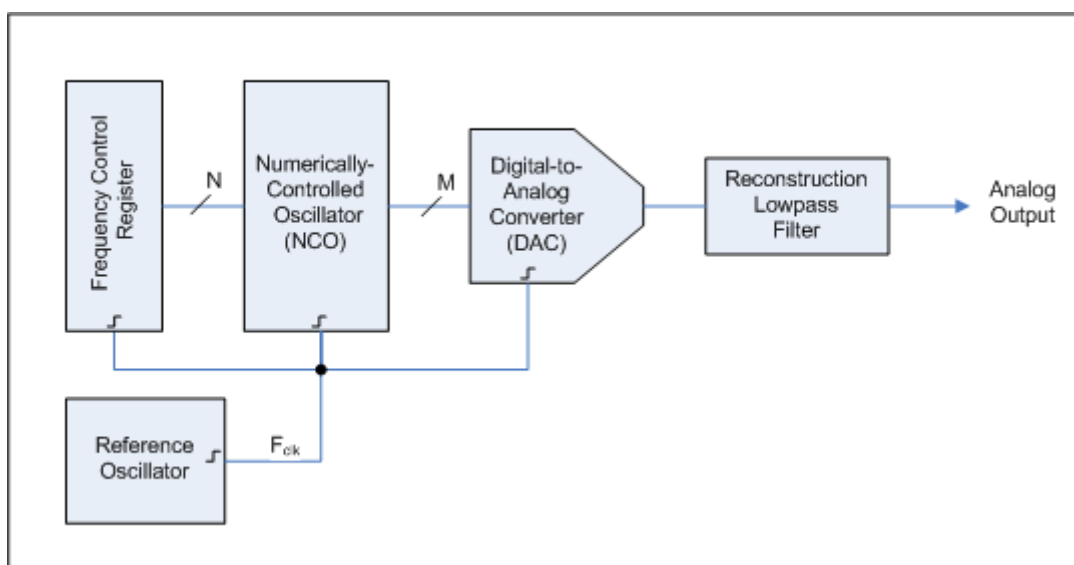


Рисунок 1.6 - Блок-схема DDS

Сучасні 32-бітні мікроконтролери, такі як STM32 серії G4, оснащені спеціалізованою периферією для задач цифрового керування живленням та генерації сигналів. Наявність швидкісних ЦАП (з частотою оновлення до 15 Мвиб/с) та таймерів високої роздільної здатності (HRTIM) дозволяє реалізувати ступінчасту апроксимацію складних сигналів без використання зовнішніх мікросхем DDS.

Основною перевагою цифрового методу є можливість програмного керування параметрами сигналу. Зміна частоти, ширини смуги або форми імпульсу не вимагає перепайки компонентів, а здійснюється зміною

коефіцієнтів у програмному коді. Це відповідає концепції програмно-визначуваного радіо (SDR), адаптованій для ультразвукових застосувань.

Ключовою гіпотезою даного дослідження є твердження, що ступінчаста апроксимація Sinc-сигналу, згенерована мікроконтролером, зберігає основні спектральні переваги ідеального сигналу в робочій смузі частот, тоді як шуми квантування та дзеркальні частоти, що виникають внаслідок дискретизації, можуть бути ефективно відфільтровані простими пасивними ланцюгами нижчих порядків. Це дозволить відмовитися від складних аналогових трактів та створити компактний пристрій для регенерації шкіри.

Таблиця 1.4.1 - Порівняльний аналіз архітектур генерації УЗ-сигналу.

Характеристика	Аналоговий (Клас AB)	Аналоговий (Клас D)	Запропонований (STM32 + Драйвер)
Ефективність (ККД)	Дуже низька ($<10\%$ на ВЧ)	Дуже висока ($>90\%$)	Висока (ККД драйвера/підсилювача)
Тепловиділення	Екстремально високе	Дуже низьке	Низьке
Лінійність (THD)	Дуже висока (низький THD)	Низька (високий THD)	Визначається ЦАП (висока)
Складність вихідного фільтра	Низька	Дуже висока (фільтр ВЧ-порядку)	Низька (фільтр НЧ-порядку)
Гнучкість сигналу	Низька (фіксована апаратно)	Низька	Висока (програмна, SDU)
Складність / Вартість BOM	Висока (масивне охолодження)	Висока (складний фільтр)	Дуже низька (МК + драйвер)

1.6 Висновок 1 розділу

У першому розділі магістерської дисертації проведено аналітичний огляд сучасних методів апаратної косметології та обґрунтовано доцільність впровадження технології цифрового синтезу ультразвукових сигналів. Встановлено, що для ефективної регенерації шкіри оптимальним є використання височастотного ультразвуку в діапазоні 10–19 МГц, оскільки це дозволяє сфокусувати енергію в межах дерми та епідермісу без впливу на глибокі тканини. Аналіз існуючих аналогових рішень виявив їхні ключові недоліки, серед яких низька енергоефективність, значне тепловиділення та обмежені можливості керування спектром сигналу, що призводить до появи побічних гармонік і паразитного нагріву. Для усунення цих проблем запропоновано використання сигналу форми Sinc, згенерованого методом прямого цифрового синтезу, що забезпечує концентрацію енергії виключно в терапевтичному діапазоні та дозволяє створити портативний пристрій без громіздких систем охолодження.

2 РОЗДІЛ 2: МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ

2.1 Методологія ступінчастої апроксимації $\text{Sinc}(t)$ на STM32

Для цифрової генерації *sinc*-імпульсу в МГц-діапазоні пропонується два основних методи, що реалізуються на базі мікроконтролера STM32.

Метод 1: Генерація через ЦАП (DAC) + DMA (Пріоритетний метод)

Цей метод є класичною реалізацією DDS-генератора довільної форми. Архітектура реалізації складається з трьох етапів [7], [25]:

1. Offline-розрахунок: Форма *sinc*-імпульсу розраховується математично (наприклад, у MATLAB або Python) і квантується з необхідною розрядністю (наприклад, 12 біт). Отриманий масив точок (Lookup Table, LUT) зберігається у флеш-пам'яті мікроконтролера.
2. Конфігурація периферії: Налаштовується апаратний таймер (TIM) для генерації події-тригера з частотою оновлення f_s (наприклад, 15 МГц).
3. Автоматична генерація: Контролер прямого доступу до пам'яті (DMA) налаштовується на передачу одного слова (12 біт) з LUT до регістра даних ЦАП (DAC_DHRx) за кожним тригером від таймера.

Ключовою перевагою цього підходу є нульове навантаження на центральний процесор (ЦП) під час генерації. ЦП запускає процес один раз, і далі вся генерація відбувається автономно апаратними блоками DMA, TIM та DAC, вивільняючи ЦП для інших задач (наприклад, інтерфейсу користувача або контролю терапії).

Критичним параметром для реалізації є максимальна швидкість оновлення (Update Rate) ЦАП. Для генерації сигналу з терапевтичною смугою $B = 5$ МГц, згідно з теоремою Найквіста-Шеннона, потрібна частота дискретизації f_s щонайменше 10 MSps (Мега-вибірків в секунду). Аналіз документації STM32 показує:

- STM32F407: Максимальна швидкість ЦАП до 10.5 MSps.
- STM32H7: Стандартна швидкість 1 MSps, що недостатньо. Хоча вона може бути розширена до 10 MSps, це вимагає зовнішнього операційного підсилювача, що ускладнює схему.
- STM32G4: Вбудований ЦАП має максимальну швидкість оновлення 15 MSps.

Цей показник (15 MSps) робить серію STM32G4 не просто "прикладом", а ключовою технологією, що робить гіпотезу життєздатною. Ця швидкість забезпечує необхідну передискретизацію ($f_s = 15 \text{ Msps}$ для сигналу $B = 5 \text{ МГц}$), що є основою для подальшого спектрального доведення.

Метод 2: Генерація через "PWM DAC" (Альтернативний метод)

Як альтернатива, аналоговий сигнал можна згенерувати за допомогою високочастотного ШІМ (PWM), який по суті є 1-бітним ЦАП. Після проходження через простий RC/LC-фільтр низької частоти, ШІМ-сигнал усереднюється до відповідного рівня напруги. Для отримання високої точності (наприклад, еквівалент 12 біт) потрібна дуже висока тактова частота ШІМ.

Тут знову ж таки, STM32G4 має унікальну перевагу – таймер високої роздільної здатності (HRTIM). З роздільною здатністю 184 пікосекунди (що еквівалентно тактуванню 5.4 ГГц), HRTIM дозволяє генерувати ШІМ з надзвичайно точним керуванням скважністю. Це дозволяє отримати високоточний аналоговий сигнал на виході фільтра, що є життєздатною альтернативою вбудованому ЦАП. [7]

2.2 Теоретичний спектральний аналіз: Вплив дискретизації та квантування

Цифрова генерація сигналу вносить у сигнал два основних типи артефактів: ефекти від утримання сигналу (ZOH) та шум квантування.

Ефект утримання нульового порядку (ZOH):

Вихід ЦАП не є плавною кривою. Він є ступінчастою апроксимацією, де кожне значення вибірки утримується постійним протягом одного такту $T_s = 1/f_s$. У частотній області цей ефект "утримання" (Zero-Order Hold, ZOH) діє як фільтр низьких частот з амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ), що описується *sinc*-функцією.

Ця АЧХ має два важливі наслідки:

1. Небажаний (Droop): Спричиняє нерівномірність (спад) амплітуди в межах основної смуги (Перша зона Найквіста, 0 - $f_s/2$). На частоті $f_s/2$ цей спад досягає ~ 4 дБ. Це детермінований ефект, який можна легко компенсувати програмно, застосувавши зворотний ("inverse sinc") фільтр до LUT у цифровій формі.
2. Бажаний (Attenuation): Цей же *sinc*-спад діє як природний фільтр, що пригнічує амплітуду "дзеркальних" частот (aliased images) у вищих зонах Найквіста (навколо f_s , $2f_s$ і т.д.). Ця властивість буде використана для спрощення фільтрації [13], [14].

Ефект квантування (Розрядність):

Перетворення ідеального аналогового *sinc(t)* у 12-бітні (або 8-бітні) цілочисельні значення для LUT додає в сигнал шум квантування. Цей шум не є суто білим шумом. Оскільки помилка квантування корелює з формою сигналу, вона проявляється у спектрі у вигляді:

- Гармонійних спотворень (гармонік) основного сигналу.
- Паразитних частот (spurs), що не є гармоніками.

Чим вища розрядність (12 біт краще за 8 біт), тим нижчий рівень цього шуму та спотворень.

2.3 Доведення спектральної еквівалентності (Валідація гіпотези)

Ключова гіпотеза стверджує, що спектр ступінчастого сигналу в терапевтичній смузі є еквівалентним ідеальному. Доведення цієї гіпотези

будується на комбінації ефектів дискретизації, ЗОН та передискретизації (oversampling).

Розглянемо запропоновану систему з $B = 5$ МГц (смуга сигналу) та $f_s = 15$ Msps (частота оновлення ЦАП STM32G4).

1. Терапевтичний сигнал $S(f)$: Наш корисний сигнал існує у смузі частот від 0 до 5 МГц.
2. Теорема Найквіста: Згідно з теоремою Найквіста-Шеннона, мінімально допустима частота дискретизації (f_N) становить $2 \times B = 10$ Msps. [13]
3. Передискретизація: Ми свідомо обираємо $f_s = 15$ Msps, що значно вище за f_N .
4. Артефакти: Процес дискретизації створює "дзеркальні" копії нашого сигналу $S(f)$ у спектрі. Ці копії симетрично розташовуються навколо частот, кратних f_s (тобто $f_s, 2 f_s, 3 f_s$ і т.д.).
5. Локалізація артефактів: Найближча і найпотужніша "дзеркальна" копія буде віддзеркаленням смуги 0-5 МГц відносно $f_s = 15$ МГц. Таким чином, ця "дзеркальна" смуга буде розташована в діапазоні, що дорівнює [10 МГц, 15 МГц].
6. "Чистий" проміжок (Guard Band): Завдяки передискретизації ($f_s = 1.5 \times f_N$), ми створили "чистий" частотний проміжок між кінцем нашого корисного сигналу (5 МГц) та початком першого цифрового артефакту (10 МГц).
7. Природне пригнічення: Як зазначено у 2.2, цей "дзеркальний" артефакт (10-15 МГц) вже природно ослаблений *sinc*-спадом від ЗОН, який має повний нуль (null) на частоті $f_s = 15$ МГц.

Висновок: Всі небажані артефакти, що є невід'ємною частиною цифрової генерації (шум квантування, дзеркальні частоти), спектрально

відокремлені від терапевтичної смуги 0-5 МГц. Вони не змішуються з корисним сигналом, а лежать у високочастотній області (>10 МГц).

2.4 Спрощення аналогового фронт-енду (AFE) та переваги рішення

Доведення з п. 2.3 має прямі та вкрай позитивні наслідки для проектування апаратної частини.

Оскільки всі цифрові артефакти знаходяться у відокремленій ВЧ-смугі (>10 МГц), для їх видалення не потрібен складний, дорогий фільтр високого порядку з гострою АЧХ (який був необхідний для очищення сигналу підсилювача класу D).

Натомість, достатньо простого пасивного LC-фільтра 2-го порядку або активного фільтра 4-го порядку (наприклад, фільтра Салена-Кея) з частотою зрізу, встановленою у "чистому" проміжку (наприклад, $f_c \approx 7$ МГц). Цей фільтр буде пропускати корисний сигнал (0-5 МГц) практично без змін, але ефективно пригнічуватиме "дзеркальні" частоти (10-15 МГц).

Запропонована архітектура дозволяє радикально скоротити вартість та складність кінцевого пристрою (Bill of Materials, BOM):

1. Заміна дорогого, високоточного аналогового генератора сигналів та потужного підсилювача класу АВ одним мікроконтролером (вартістю $\sim 3-5$) та простим драйвером (напр., високоефективним підсилювачем класу D, який тепер працює з чистим вхідним сигналом).
2. Використання МК серії STM32G4, який інтегрує в собі не тільки ЦП і ЦАП, але й іншу "аналогову обв'язку" (операційні підсилювачі, компаратори), ще більше зменшує кількість зовнішніх компонентів.

Одним з основних технічних переваг є охолодження: відмова від неефективного класу АВ означає радикальне зменшення тепловиділення. Це дозволяє відмовитися від масивних радіаторів, що прямо веде до

зменшення ваги, габаритів та вартості корпусування пристрою. Іншим не менш вагомим покращенням є гнучкість: Найважливіша перевага – перенесення складності з апаратного забезпечення у програмне забезпечення. Це є стратегічною перевагою:

- Прискорюється цикл розробки (R&D).
- Дозволяє випускати оновлення та нові терапевтичні протоколи (наприклад, змінити ширину *sinc*-смуги, адаптувати сигнал під новий тип перетворювача) шляхом простого оновлення прошивки, без зміни "заліза".

Таблиця 2.1 - Аналіз периферійних можливостей МК STM32 для генерації ВЧ-сигналів.

Характеристика	STM32F407	STM32G474	STM32H743
Макс. частота ЦП	168 МГц	170 МГц (з FPU)	480 МГц
Макс. швидкість ЦАП	10.5 Msps (з DMA/TIM)	15 Msps (з DMA/TIM)	1 Msps (до 10 Msps з зовнішнім ОП)
Роздільна здатність HRTIM	Немає	184 пс	Немає
Наявність DMA	Так	Так (з гнучким мапінгом)	Так
Аналогова спеціалізація	Загального призначення	Так ("Performance Analog")	Ні (Висока продуктивність)

2.5 Моделювання сигналу

У рамках даного розділу було вирішено актуальне науково-технічне завдання, пов'язане з оптимізацією методів цифрового синтезу ультразвукових сигналів для медичних застосувань. Основною метою моєї роботи стала розробка та верифікація параметрів генерації сигналу, який би відтворював спектральні характеристики ідеального *sinc*-імпульсу (Рис. 2.1), використовуючи при цьому доступну елементну базу, зокрема мікроконтролери серії STM32. У процесі дослідження я спирався на концепцію програмно-визначуваного ультразвуку, що дозволяє замінити громіздкі аналогові схеми компактними цифровими рішеннями, суттєво знижуючи вартість та габарити кінцевого пристрою.



Рисунок 2.1 - Реальний Sinc-сигнал та його спектр

Ключовим етапом стало створення та дослідження параметризованої математичної моделі ступінчастої апроксимації сигналу. При розробці моделі я враховував жорсткі апаратні обмеження обраного мікроконтролера, які безпосередньо впливають на форму вихідного сигналу. Зокрема, було проаналізовано вплив часової дискретності цифро-аналогового перетворювача, де мінімальний крок зміни напруги становить 8 наносекунд, що відповідає частоті оновлення 125 МГц. Також я взяв до уваги асиметрію вихідних рівнів напруги драйвера, який здатен формувати лише два стани: позитивний рівень +24 В та негативний рівень -5 В.

У ході подальшого моделювання в середовищі MATLAB я працював над удосконаленням форми апроксимуючого сигналу. Мої початкові експерименти базувалися на триімпульсній моделі, яка складалася з послідовності негативного, позитивного та знову негативного імпульсів. Проте результати первинного спектрального аналізу показали, що такий підхід, хоч і є перспективним, потребує доопрацювання для покращення спектральних характеристик. Зокрема, я спостерігав небажані сплески гармонік після основного спаду спектру, що могло знизити ефективність терапевтичної дії. Для вирішення цієї проблеми було реалізовано складнішу п'ятиімпульсну конфігурацію, додавши до основної послідовності додаткові малі бічні піки. Це дозволило наблизити спектр цифрового сигналу до бажаної форми та забезпечити краще пригнічення позасмугових випромінювань у критичному діапазоні 5-15 МГц.

Найбільш значущим результатом стало впровадження у математичну модель фізичних параметрів реального навантаження. Я відійшов від ідеалізованого цифрового представлення сигналу та врахував, що п'єзoeлектричний випромінювач має значну власну ємність, а з'єднувальні

провідники та драйвер — активний опір. Для цього було розроблено та інтегровано у розрахунки програмний модуль, що імітує проходження сигналу через еквівалентний RC-ланцюг із параметрами активного опору 6 Ом та ємності 800 пФ. Моделювання переконливо довело, що наявність цієї реактивної складової у реальному пристрої відіграє позитивну роль. Ємність п'єзоелемента діє як пасивний фільтр низьких частот, природним чином згладжуючи круті фронти прямокутних цифрових імпульсів (Рис. 2.2). Це згладжування значно покращило спектральну картину, забезпечивши додаткове пригнічення високочастотних гармонік вище 30 МГц, які неминуче виникають при цифровому синтезі.

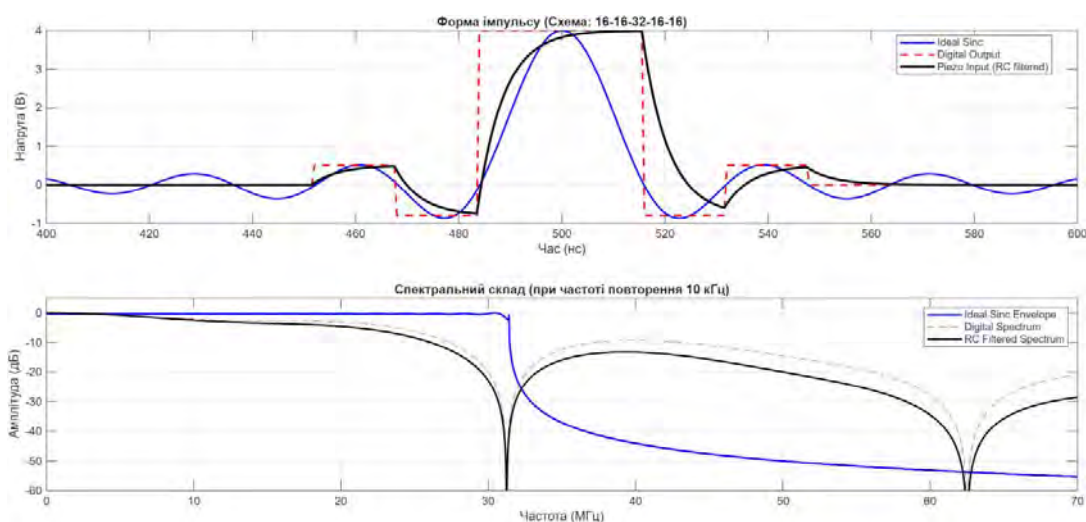


Рисунок 2.2 - Моделювання sinc-сигналу та цифрового сигналу та їх спектрів з застосуванням фільтрів та нормалізацією спектру.

2.6 Висновок 2 розділу

У другому розділі виконано моделювання процесів цифрової генерації сигналів та підтверджено гіпотезу про можливість використання ступінчастої апроксимації для медичних цілей. Результати досліджень показали, що застосування мікроконтролера STM32G4 з частотою дискретизації 15 МГц забезпечує формування якісного сигналу в смузі до 5 МГц, при цьому всі шуми квантування та дзеркальні частоти зміщуються у високочастотну область понад 10 МГц. Таке спектральне рознесення корисного сигналу та артефактів дозволяє відмовитися від складних активних фільтрів на користь простих пасивних LC-ланцюгів, що значно спрощує схемотехніку вихідного каскаду. Отримані дані підтверджують, що обрана апаратна база та методика цифрового синтезу

дозволяють досягти необхідної спектральної чистоти випромінювання при мінімальних апаратних витратах.

У підсумку, проведене дослідження дозволило закласти надійний теоретичний фундамент для апаратної реалізації генератора. Було сформовано та обґрунтовано оптимальні набори часових та амплітудних параметрів для налаштування мікроконтролера. Запропонована мною симетрична конфігурація імпульсів дозволяє зосередити максимальну енергію в корисній смузі частот 0-5 МГц, мінімізуючи при цьому енергетичні втрати та паразитне випромінювання. Мої результати підтверджують, що використання доступних мікроконтролерів для прямого цифрового синтезу складних сигналів типу sinc є технічно спроможним забезпечити високу якість сигналу, достатню для медичних цілей. Отримані дані відкривають можливості для створення портативних та енергоефективних ультразвукових терапевтичних приладів.

3 РОЗДІЛ 3: РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз часових обмежень цифрового синтезу сигналу

При проектуванні цифрової системи генерації ультразвукових сигналів ключовим параметром, що визначає спектральні характеристики вихідного імпульсу, є дискретність часу. Використаний мікроконтролер та цифро-аналоговий перетворювач накладають жорсткі обмеження на мінімальну тривалість зміни стану вихідного ключа. Згідно з технічними характеристиками обраної елементної бази, мінімальний крок формування сигналу становить 8 наносекунд. Це значення визначає максимальну частоту оновлення вихідного стану системи та накладає обмеження на спектр генерованого сигналу.

Часова дискретність безпосередньо впливає на можливість формування крутих фронтів імпульсу. Якщо тривалість одного такту роботи системи складає мінімально можливий проміжок часу, то формування імпульсу меншої тривалості є фізично неможливим. Для забезпечення коректної апроксимації *sinc*-функції необхідно, щоб перехідні процеси у навантаженні встигали відбутися протягом цього мінімального тактового інтервалу. Виходячи з цього, розрахункова тривалість мінімального керуючого імпульсу приймається рівною апаратному ліміту перемикавання.

$$\tau_{min} = 8 \cdot 10^{\{-9\}} \quad (2)$$

, де τ_{min} – мінімально можлива тривалість імпульсу або паузи, с. Це значення є вихідним для подальшого розрахунку параметрів реактивних елементів вихідного ланцюга та узгодження імпедансу драйвера з навантаженням.

3.2 Розрахунок сталої часу RC-ланцюга навантаження

Реальне навантаження генератора, яким виступає п'єзоелектричний перетворювач, має виражений ємнісний характер. Згідно з паспортними даними використовуваного випромінювача, його електрична ємність становить 800 пікофарад. Разом з активним опором вихідних ключів драйвера та з'єднувальних провідників ця ємність утворює інтегруючий RC-ланцюг, який впливає на форму вихідного сигналу, згладжуючи його фронти. Для забезпечення ефективної передачі енергії у навантаження та збереження форми імпульсу необхідно, щоб стала часу цього ланцюга була узгоджена з мінімальною тривалістю імпульсу.

Стала часу визначає швидкість наростання напруги на ємнісному навантаженні. Для того щоб напруга на п'єзоелементі встигла досягти амплітудного значення за час дії найкоротшого імпульсу цифрової послідовності, стала часу повинна бути меншою за тривалість цього імпульсу. Критично важливим є визначення максимально допустимого активного опору ланцюга, при якому не виникатиме надмірного завалу фронтів сигналу. Використовуючи значення ємності навантаження та часові обмеження, можна визначити необхідний сумарний опір драйвера.

Розрахунок активного опору базується на формулі сталої часу RC-ланцюга:

$$\tau = R \cdot C \quad (3)$$

Де τ – стала часу, с; R – активний опір ланцюга, Ом; C – ємність навантаження, Ф.

Звідси необхідний опір визначається як:

$$R = \frac{\tau}{C} \quad (4)$$

Приймаючи бажану сталу часу такою, що забезпечує заряд ємності протягом дії мінімального імпульсу (розглядаючи τ як частину від τ_{min} , наприклад, для забезпечення швидкодії на рівні 30-40% від тривалості імпульсу для гарантованого перемикавання), підставимо значення ємності $C = 800$ пФ. Для забезпечення чіткого фронту в межах 8 нс, доцільно обрати розрахункову сталу часу на рівні 2.8 - 3.0 нс.

$$R_{calc} = \frac{2.8 \cdot 10^{-9}}{800 \cdot 10^{-12}} = 3.5 \quad (5)$$

де R_{calc} – розрахунковий необхідний активний опір драйвера, Ом.

3.3 Узгодження вихідного опору драйвера HV7360

Для реалізації високовольтного вихідного каскаду обрано спеціалізовану мікросхему HV7360. Згідно з технічною документацією, даний драйвер побудований на базі технології HVCMOS і містить вихідні польові транзистори (MOSFET). Важливим параметром є статичний опір відкритих транзисторів у ввімкненому стані. [8]

Аналіз електричних характеристик мікросхеми показує, що опір каналу сток-витік у відкритому стані (Static Drain-to-source ON-state Resistance) для Р-канальних транзисторів становить типово 8.5 Ом, а для N-канальних транзисторів – близько 7.0 Ом (Рис. 3.1).

Electrical Specifications: GND = 0V, V _H = V _{DD} = +10V, V _L = V _{SS} = 0V, V _{PE} = 3.3V, V _{PP} = +100V, V _{NN} = -100V, T _A = 25°C unless otherwise specified.						
Parameters	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
PULSER AND DAMPING P-CHANNEL MOSFET						
DC PARAMETERS						
Drain-to-source Breakdown Voltage	BV _{DSS}	-200	—	—	V	V _{GS} = 0V, I _D = -2 mA
Gate Threshold Voltage	V _{GS(th)}	-1	—	-2.4	V	V _{GS} = V _{DS} , I _D = -1 mA
Change in V _{GS(th)} with Temperature	ΔV _{GS(th)}	—	—	4.5	mV/°C	V _{GS} = V _{DS} , I _D = -1 mA
Gate-to-source Shunt Resistor	R _{GS}	10	—	50	kΩ	I _{GS} = 100 μA, if applied
Gate-to-source Zener Voltage	V _{ZGS}	13.2	—	25	V	I _{GS} = -2 mA, if applied
Zero-gate Voltage Drain Current	I _{DSS}	—	—	-10	μA	V _{DS} = Maximum rating, V _{GS} = 0V
		—	—	-1	mA	V _{DS} = 0.8 maximum rating, V _{GS} = 0V, T _A = 125°C
ON-state Drain Current	I _{D(ON)}	-1.2	—	—	A	V _{GS} = -5V, V _{DS} = -25V
		-2.3	-2.5	—		V _{GS} = -10V, V _{DS} = -50V
Static Drain-to-source ON-state Resistance	R _{DS(ON)}	—	—	8.5	Ω	V _{GS} = -5V, I _D = -150 mA
		—	—	7		V _{GS} = -10V, I _D = -1A
Change in R _{DS(ON)} with Temperature	ΔR _{DS(ON)}	—	—	1	%/°C	V _{GS} = -10V, I _D = -1 mA
AC PARAMETERS						
Forward Transconductance	G _{FS}	400	—	—	mmho	V _{DS} = -25V, I _D = -500 mA
Input Capacitance	C _{ISS}	—	75	—	pF	V _{GS} = 0V, V _{DS} = -25V, f = 1 MHz
Common Source Output Capacitance	C _{OSS}	—	21	—		
Reverse Transfer Capacitance	C _{RSS}	—	6.5	—		
DIODE PARAMETERS						
Diode Forward Voltage Drop	V _{SBD}	—	—	1.8	V	V _{GS} = 0V, I _{SD} = 500 mA
Reverse Recovery Time of Body Diode	t _{rrBD}	—	300	—	ns	
PULSER AND DAMPING N-CHANNEL MOSFET						
DC PARAMETERS						
Drain-to-source Breakdown Voltage	BV _{DSS}	200	—	—	V	V _{GS} = 0V, I _D = 2 mA
Gate Threshold Voltage	V _{GS(th)}	1	—	2.4	V	V _{GS} = V _{DS} , I _D = 1 mA

Рисунок 3.1 - Електричні параметри HV7360 [8]

Це значення перевищує розрахунковий опір 3.5 Ом, необхідний для швидкого перезаряду ємності п'єзoelementa в 800 пФ. Використання одного каналу призведе до збільшення сталої часу до рівня:

$$\tau_{single} = 7.0 \cdot 800 \cdot 10^{-12} = 5.6 \cdot 10^{-9} \quad (6)$$

де τ_{single} – стала часу при використанні одного каналу, с. При такій сталій часу тривалість повного заряду ємності (3-5 τ) значно перевищить мінімальну тривалість імпульсу 8 нс, що призведе до значних спотворень сигналу та втрати амплітуди коротких імпульсів.

Для вирішення цієї проблеми та зниження вихідного імпедансу застосовано схемотехнічне рішення (Рис. 3.2), що полягає у паралельному включенні двох каналів мікросхеми HV7360 (або паралельному з'єднанні

виходів ідентичних драйверів). При паралельному з'єднанні двох провідників їх загальний опір зменшується.

$$R_{total} = \frac{R_{DS1} \cdot R_{DS2}}{R_{DS1} + R_{DS2}} \quad (7)$$

де R_{DS1} , R_{DS2} – опори каналів першого та другого драйверів відповідно, Ом.

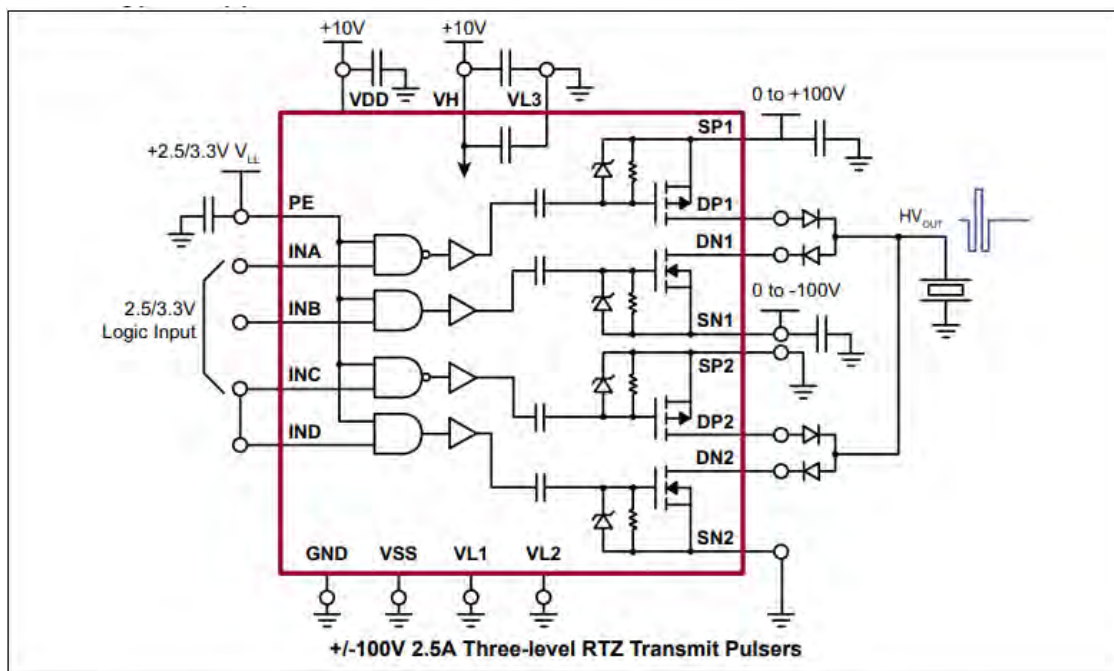


Рисунок 3.2 - Принципова схема HV7360

Припускаючи ідентичність параметрів каналів (наприклад, $R_{DS} = 7$ Ом), отримаємо результуючий опір:

$$R_{total} = \frac{7 \cdot 7}{7 + 7} = 3.5 \quad (8)$$

Це значення повністю відповідає розрахунковому опору R_{calc} , отриманому в попередньому підрозділі. Таким чином, паралельне підключення вихідних каскадів дозволяє досягти необхідної швидкодії та забезпечити коректне формування 8-наносекундних імпульсів на ємнісному навантаженні.

3.4 Висновок 3 розділу

У третьому розділі проведено розрахунок основних параметрів вихідного каскаду генератора ультразвукових сигналів. Визначено, що основним обмежуючим фактором швидкодії системи є ємнісне навантаження п'єзоелектричного перетворювача номіналом 800 пФ у поєднанні з мінімальним часовим кроком цифрового синтезу 8 нс.

Шляхом розрахунку сталої часу RC-ланцюга встановлено, що для коректного відтворення форми сигналу активний опір драйвера не повинен перевищувати 3.5 Ом. Аналіз технічної документації драйвера HV7360 виявив, що власний опір його вихідних транзисторів (7-8.5 Ом) є недостатньо низьким для забезпечення необхідної динаміки (Рис. 3.1).

На основі проведених обчислень обґрунтовано необхідність зміни топології вихідного каскаду шляхом паралельного включення вихідних каналів драйвера. Це дозволило знизити вихідний опір до розрахункового значення 3.5 Ом, узгодити його з ємністю навантаження та гарантувати формування імпульсів заданої тривалості без критичних спотворень форми сигналу.

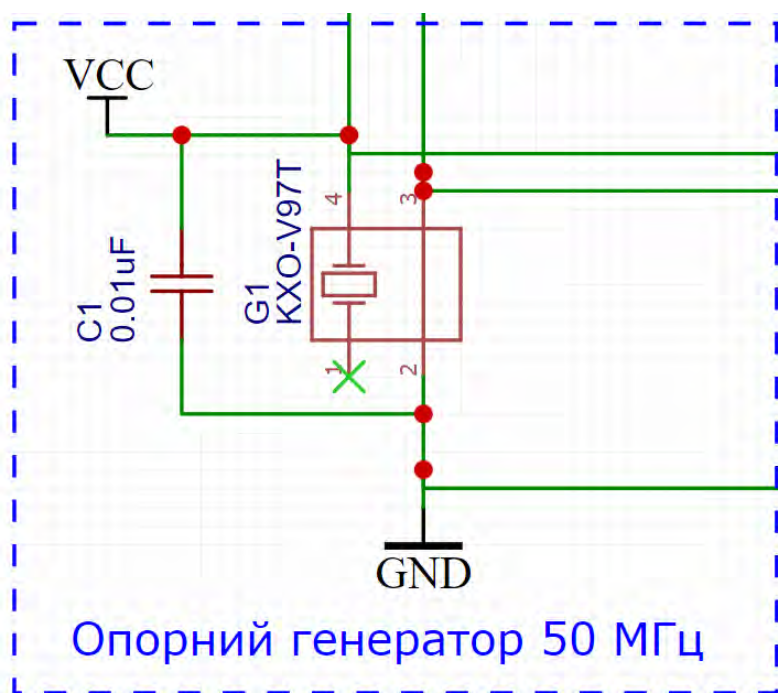


Рисунок 4.2 - Підключення опорного генератора в принциповій електричній схемі

Синтезатори частоти

Наступним функціональним вузлом схеми є блок синтезу частоти, реалізований на базі двох ідентичних мікросхем, що мають однакову схему підключення. Особливістю їхнього функціонування є програмна синхронізація з боку мікроконтролера, яка налаштована таким чином, щоб забезпечити формування на виходах квадратурних сигналів — синусоїдального та косинусоїдального відповідно.

У якості елементної бази для цього вузла обрано мікросхему AD9835. Це інтегральний числово-керований генератор (NCO), виконаний за технологією CMOS, архітектура якого об'єднує фазовий акумулятор, таблицю значень косинуса та 10-бітний цифро-аналоговий перетворювач на одному кристалі. Пристрій розрахований на роботу з тактовою частотою до 50 МГц і підтримує функції фазової та частотної модуляції, керування якими здійснюється через послідовний інтерфейс шляхом запису даних у внутрішні регістри. Завдяки високій розрядності фазового акумулятора

досягається надзвичайна точність налаштування частоти (роздільна здатність становить одну чотиримільярдну частину). Важливою експлуатаційною перевагою є наявність режиму енергозбереження, який активується програмно та дозволяє знизити споживання потужності до 1,75 мВт у періоди простою. Сукупність наведених технічних характеристик обґрунтовує вибір AD9835 як оптимального рішення для задач прецизійного синтезу частоти в даному проєкті. [9]

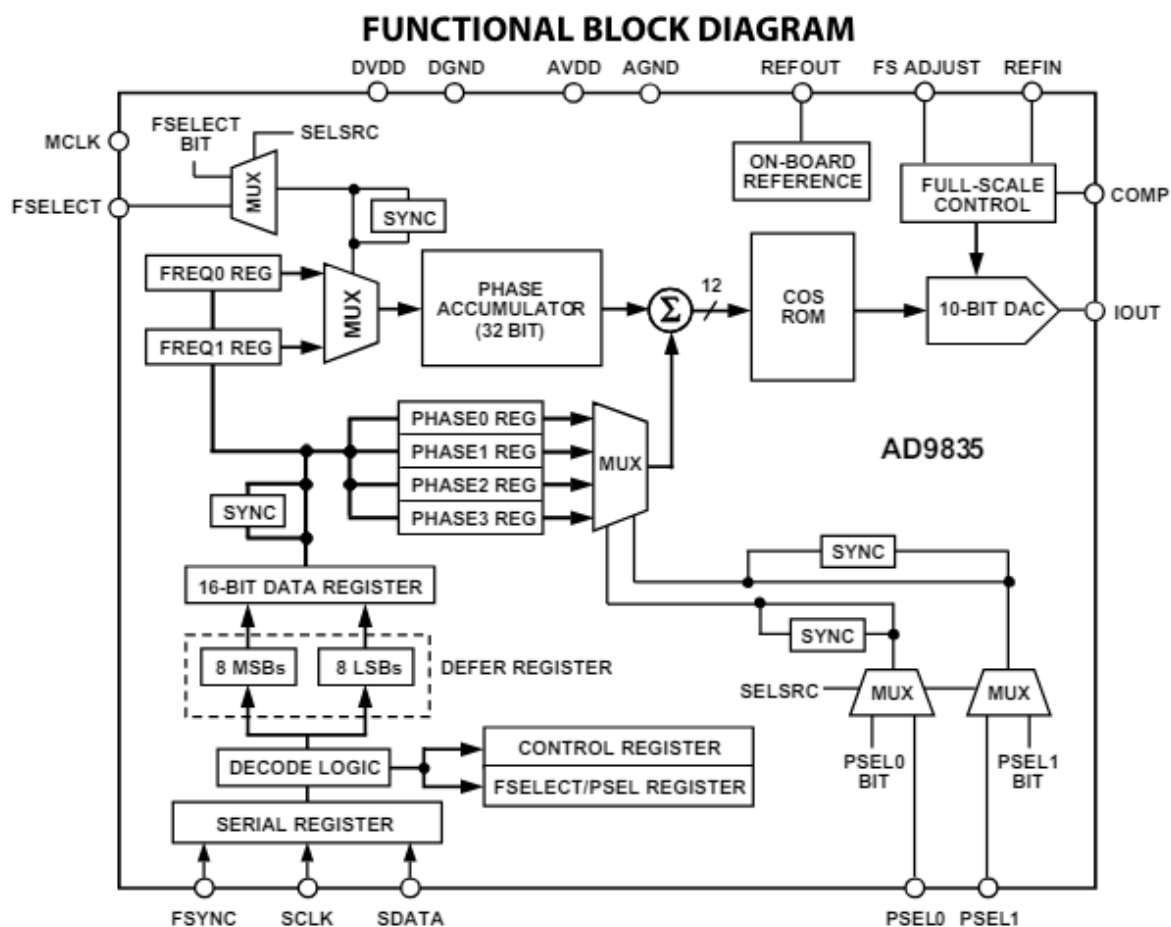


Рисунок 4.3 - Функціональна блок-діаграма AD9835

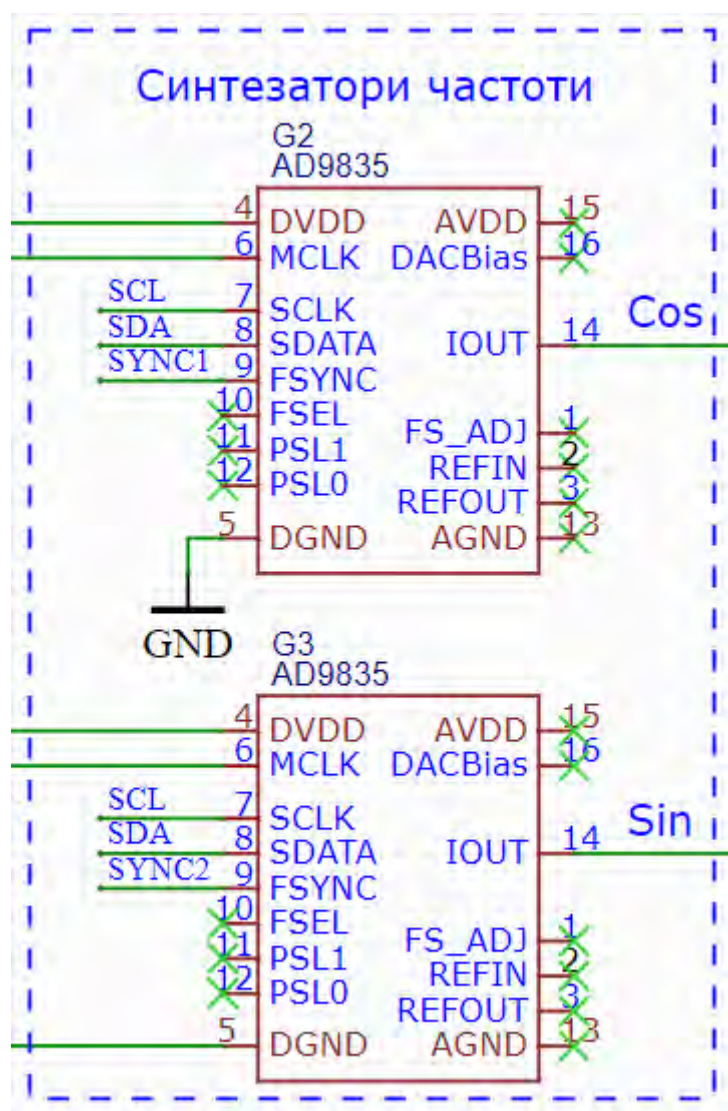


Рисунок 4.4 - Підключення синтезаторів частоти

Підсилення сигналу

Для попереднього підсилення та буферизації зчитаного сигналу застосовано модуль на базі AD711. Дана мікросхема являє собою швидкодіючий прецизійний операційний підсилювач із польовими транзисторами (JFET) на вході. Така архітектура забезпечує надзвичайно високий вхідний опір, що досягає значень порядку тераомів, та низькі вхідні струми зміщення, що є критично важливим для мінімізації навантаження на джерело сигналу. AD711 вирізняється низьким рівнем власних шумів, малим температурним дрейфом та високою швидкістю наростання вихідної напруги. Завдяки поєднанню високої швидкодії та

точності передачі сигналу, даний підсилювач є оптимальним рішенням для побудови входних буферних каскадів, активних фільтрів та для безпосереднього керування швидкодіючими аналого-цифровими перетворювачами. [10]

Множення сигналів

Реалізація множення сигналів виконана за допомогою модуля МРУ634, який є аналоговим множником чотирьох квадрантів з широкою смугою пропускання та високою точністю. Його характеристики множення, точно налаштовані за допомогою лазера, роблять його зручним для використання в широкому спектрі застосувань з мінімальною кількістю зовнішніх компонентів, часто усуваючи необхідність у зовнішньому налаштуванні. Диференційні входи X, Y та Z дозволяють налаштування як множника, квадратора, дільника, кореневика та інших функцій, зберігаючи високу точність. [11]

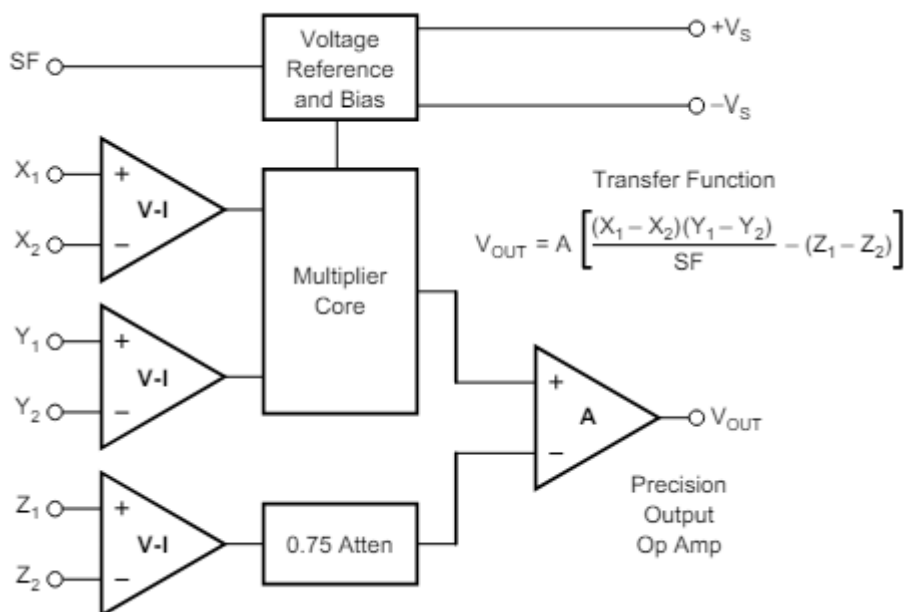


Рис. 4.7. Підключення МРУ634

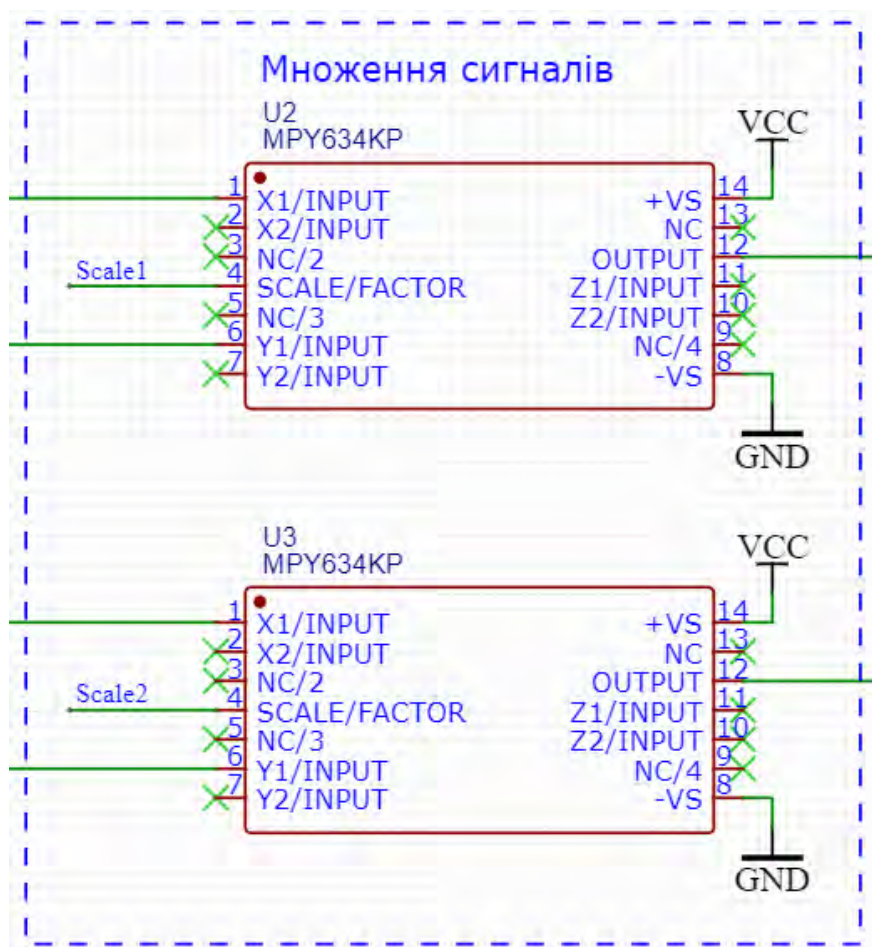


Рисунок 4.8 - Модулі множення сигналів

ФНЧ

Фільтр низьких частот реалізовано на базі резисторів, конденсаторів та операційних підсилювачів. В якості підсилювача було обрано КР1407Д608 (МС1456Р) [20]

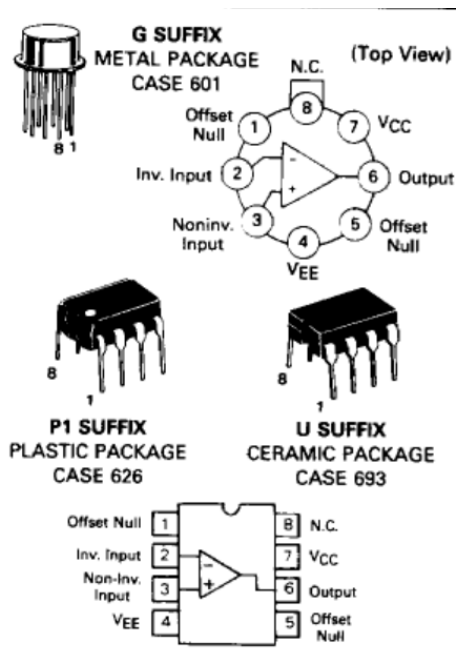


Рисунок 4.9 - Підключення MC1456P

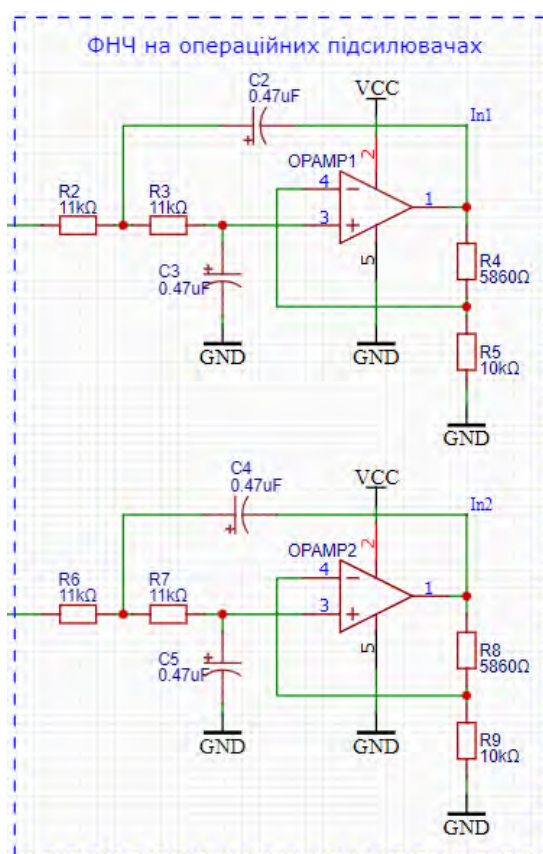


Рисунок 4.10 - Підключення ФНЧ

РК-дисплей

Виведення інформації користувачу є невід'ємним для будь-якого сучасного приладу. Було обрано рідко-кристалічний дисплей LCD1604.



Рисунок 4.11 - Дисплей LCD1604

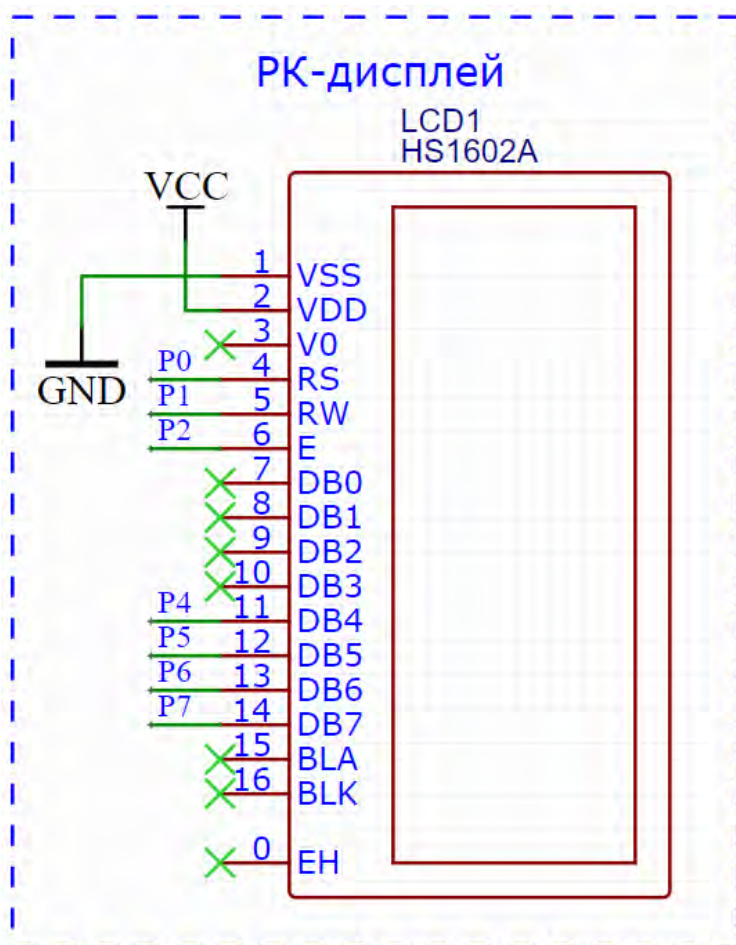


Рисунок 4.12 - Підключення РК-дисплею

Перехідник РК-дисплею

Для зручності і простоти підключення використано спеціальний модуль-перехідник який дозволяє підключити дисплей до мікроконтролера за допомогою послідовного порту I2C. Таким перехідником є PCF8574. [12]

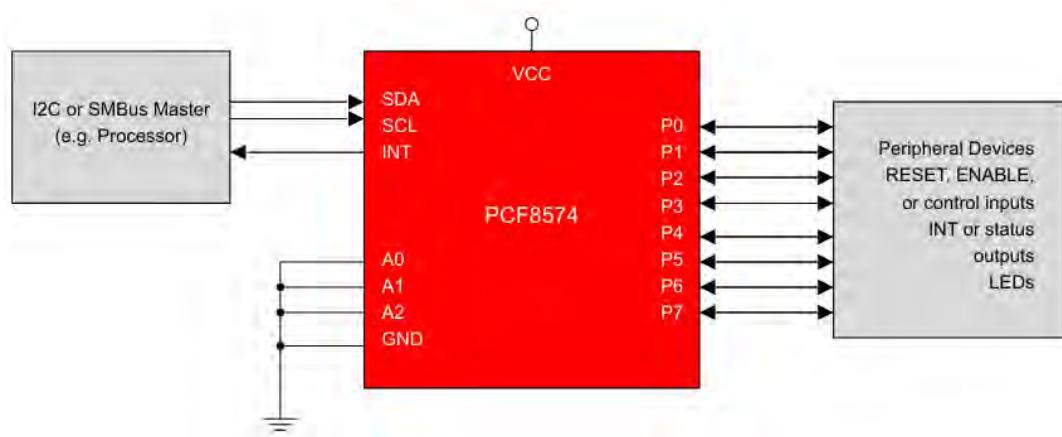


Рисунок 4.13 - Підключення PCF8574



Рисунок 4.14 - Підключення перехідника РК-дисплею

Мікроконтролер

В якості центрального керуючого елемента системи обрано мікроконтролер STM32G474, який належить до спеціалізованої лінійки Mixed-Signal MCU компанії STMicroelectronics. Вибір саме цієї моделі обумовлений її унікальною архітектурою, що поєднує високу обчислювальну потужність 32-бітного ядра ARM Cortex-M4 з тактовою частотою до 170 МГц та розширений набір прецизійної аналогової периферії. Наявність модуля обчислень з плаваючою точкою (FPU) та апаратна підтримка DSP-інструкцій дозволяють ефективно виконувати складні математичні алгоритми цифрової обробки сигналів у реальному часі, що є критично важливим для синтезу вихідних імпульсів. [7]

Ключовою перевагою STM32G474 у контексті даного проєкту є наявність інтегрованих швидкісних цифро-аналогові перетворювачів та таймера високої роздільної здатності (HRTIM), які забезпечують точне формування сигналів без необхідності використання зовнішніх DDS-синтезаторів. Мікроконтролер також оснащений вбудованими операційними підсилювачами та компараторами, що дозволяє значно зменшити кількість зовнішніх компонентів на платі, спростити схемотехніку та знизити собівартість пристрою. Розробка програмного забезпечення спрощується завдяки розвиненій екосистемі, яка включає конфігуратор STM32CubeMX та сумісність із популярними середовищами розробки (STM32CubeIDE, Keil, IAR), а великий обсяг флеш-пам'яті та SRAM надає достатньо ресурсів для зберігання коду та таблиць генерації сигналів.

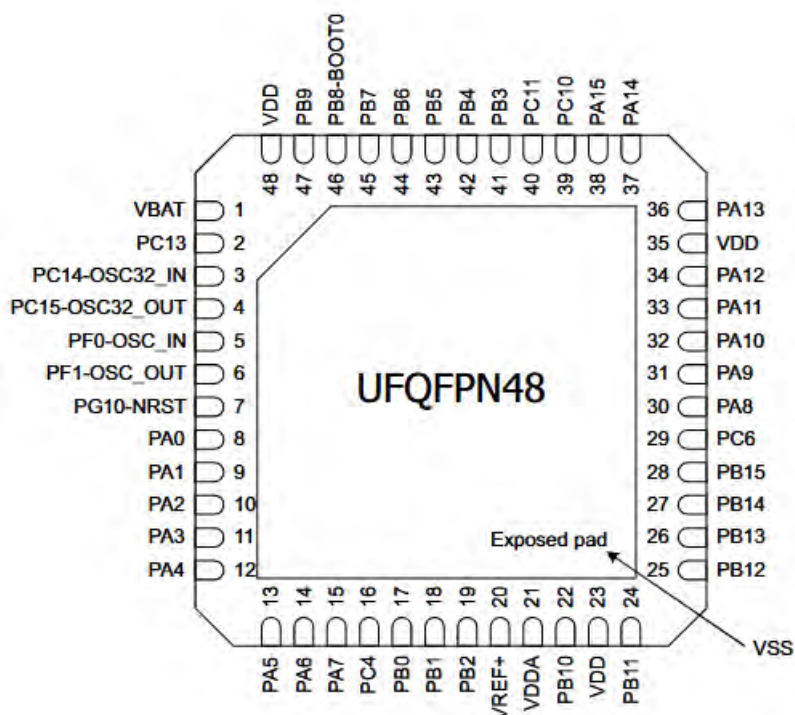


Рисунок 4.15 - Розпіновка STM32G474

4.2 Розведення друкованої плати

Розробку топології друкованої плати виконано в середовищі системи автоматизованого проектування EasyEDA. У процесі трасування забезпечено цілісність усіх електричних кіл та гарантовано відсутність технологічних дефектів, таких як обриви провідників або короткі замикання. Для механічної інтеграції виробу в конструкцію приладу передбачено кріпильні отвори діаметром 4,2 мм, розраховані на використання стандартних гвинтів M4.

З метою оптимізації виробничого процесу та зниження собівартості виготовлення застосовано одностороннє розміщення компонентів поверхневого монтажу (SMD), що спрощує автоматизоване складання та паяння. Для забезпечення зручності монтажу та налагодження на плату нанесено шар маркування (шовкографії) з позиційними позначеннями всіх

електронних компонентів відповідно до принципової електричної схеми.

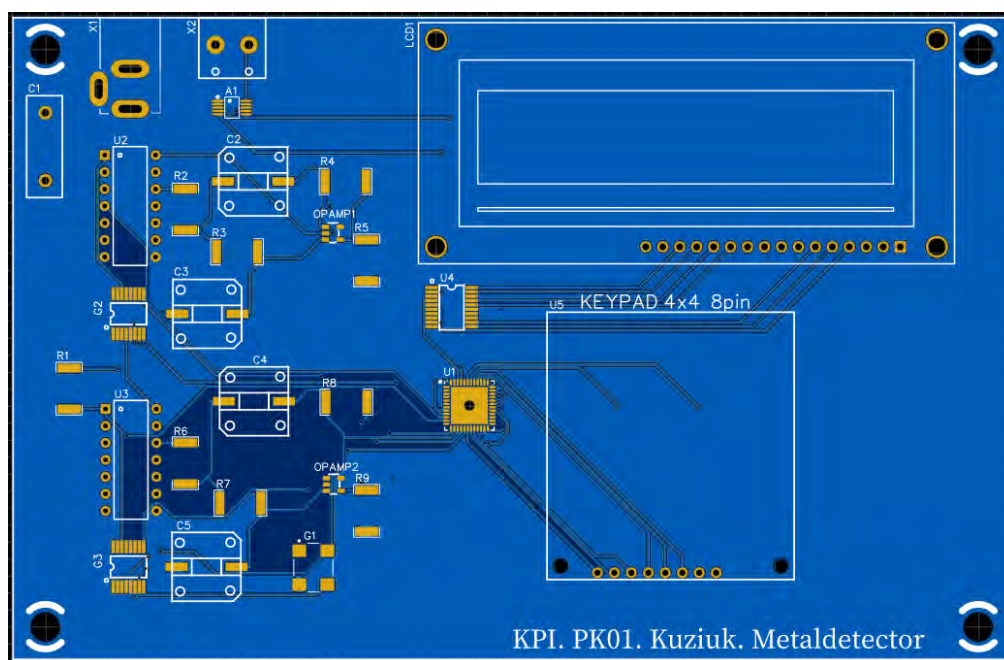


Рисунок 4.16 - Лицева сторона печатної плати

4.3 3-Д модель друкованої плати

Було також створено 3-Д модель готової плати з розташованими на ній компонентами. Це дозволяє одразу уявити як плата виглядатиме в готовому виробі та побачити помилки розташування. Також таку модель можна експортувати в різні формати щоб додати до свого проєкту в іншому САПР, наприклад, для створення кріплення в корпусі приладу.

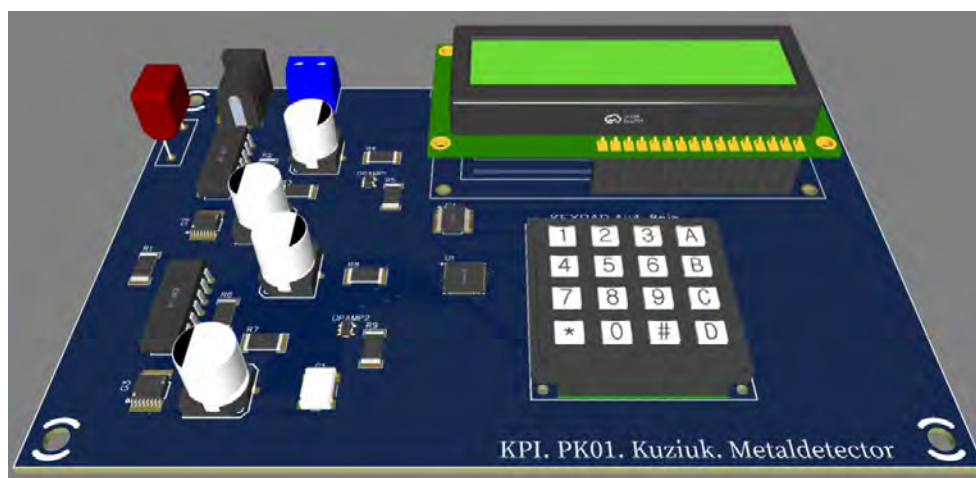


Рисунок 4.17 - 3-Д модель

4.4 Висновок 4 розділу

У даному підрозділі детально розглянуто всі елементи принципової електричної схеми, зокрема, розглянуті їх функції та характеристики. Кожен компонент ретельно проаналізований, коротко обґрунтовано причини його вибору з урахуванням його електричних властивостей та відповідності вимогам проекту. Описано, як ці елементи підключені до інших частин електричної принципової схеми, включаючи сигнальні і живильні лінії, а також зв'язки між модулями.

Крім того, створено повну тривимірну модель готової печатної плати, на якій візуалізовані всі елементи та їх розташування. Модель включає підключення всіх модулів та розведення всіх доріжок. У процесі розробки одразу були враховані отвори для кріплення, щоб забезпечити надійність монтажу плати в кінцевому пристрої.

Також розглянуто можливі варіанти розташування компонентів для оптимізації простору на платі та зменшення довжини сигнальних шляхів, що покращує загальну продуктивність та надійність системи. Усі ці аспекти сприяють створенню ефективної та надійної електричної схеми, яка відповідає вимогам проекту та забезпечує стабільну роботу готового пристрою.

5 РОЗДІЛ 5: РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗОВАНА УЛЬТРАЗВУКОВА СИСТЕМА РЕГЕНЕРАЦІЇ ШКІРИ ОБЛИЧЧЯ»

5.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

В умовах сучасного стрімкого розвитку інноваційних технологій в галузі біомедичної інженерії та естетичної медицини, питання комерціалізації наукових розробок набуває особливої актуальності. Розроблення стартап-проекту є логічним продовженням науково-дослідної роботи, спрямованим на трансформацію інженерного рішення у ринковий продукт. В даному розділі проводиться детальний маркетинговий та економічний аналіз проекту створення автоматизованої системи регенерації шкіри на базі технології цифрового синтезу ультразвукових сигналів. Основною метою розділу є визначення ринкової ніші, розробка стратегії виведення продукту на ринок та обґрунтування економічної доцільності його впровадження. [22]

5.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

Першим етапом розробки стартап-проекту є чітка ідентифікація самої ідеї, її змістового наповнення та потенційних сфер застосування. Ідея проекту базується на використанні новітніх підходів до генерації терапевтичних сигналів, що дозволяє вирішити низку проблем, притаманних існуючому обладнанню. В основі концепції лежить перехід від аналогової схемотехніки до цифрового синтезу сигналів спеціальної форми (Sinc-імпульс), що забезпечує високу селективність впливу на біологічні тканини.

Для структурування інформації щодо сутності розробки, її призначення та переваг для потенційних користувачів, було проведено аналіз, результати якого узагальнено у відповідній таблиці. У ній розкрито зміст ідеї, окреслено можливі напрямки застосування технології у

медичній та косметологічній практиці, а також визначено ключові вигоди, які отримує користувач від впровадження даного рішення.

Таблиця 5.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та виведення на ринок портативного апарату для ультразвукової регенерації шкіри, що використовує технологію прямого цифрового синтезу (DDS) на базі мікроконтролера STM32 для генерації Sinc-подібних імпульсів у діапазоні 10-19 МГц. Технологія забезпечує формування сигналу з прямокутним спектром, що дозволяє локалізувати енергію виключно у цільовому шарі дерми без паразитного нагріву навколишніх тканин.	Професійна естетична медицина: використання у косметологічних клініках та салонах краси для процедур безопераційного ліфтингу, омолодження шкіри та корекції вікових змін.	Висока ефективність процедур завдяки точному контролю глибини проникнення та відсутності побічних ефектів у вигляді термічних опіків. Можливість розширення спектра послуг клініки.
	Дерматологія та реабілітація: лікування рубцевих змін тканини, акне, прискорення загоєння після пластичних операцій та інвазивних процедур.	Скорочення термінів реабілітації пацієнтів, зменшення больових відчуттів під час процедури, висока точність дозування впливу.
	Домашня косметологія (Home Use Devices): використання пристрою кінцевими споживачами для підтримуючої терапії та щоденного догляду за шкірою.	Безпека використання непрофесіоналами завдяки автоматизованому контролю параметрів, компактність, ергономічність та простота інтерфейсу.

Аналіз даних, наведених у таблиці 5.1, свідчить про те, що запропонована ідея має широкий спектр застосування, охоплюючи як професійний сегмент (B2B), так і споживчий ринок (B2C). Ключовою цінністю для всіх груп користувачів є поєднання ефективності, яка досягається за рахунок науково обґрунтованої форми сигналу, та безпеки,

що забезпечується цифровим керуванням. Відсутність паразитних спектральних складових, характерних для аналогових генераторів, дозволяє уникнути неконтрольованого нагріву тканин, що є вагомим конкурентною перевагою.

Наступним кроком є детальний порівняльний аналіз техніко-економічних властивостей розробки з існуючими на ринку аналогами. Це дозволяє визначити слабкі, нейтральні та сильні сторони проекту, що є основою для формування його конкурентної стратегії. У якості об'єктів для порівняння обрано типові представники різних цінових та технологічних сегментів ринку: професійні системи на кшталт LDM-MED (Німеччина), технології фокусованого ультразвуку Ultherapy (США) та масові портативні пристрої азійського виробництва. [15], [26]

Таблиця 5.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	LDM-MED (Wellcomet)	Ultherapy (Merz)	Китайські аналоги
1.	Енергоефективність (ККД вихідного каскаду)	Висока (>90% завдяки використанню драйверів класу D/E та цифрового синтезу)	Низька (<50%, клас АВ)	Середня	Середня
2.	Спектральна чистота сигналу	Висока (Синус-форма, відсутність вищих гармонік)	Середня (Синусоїда з гармоніками)	Низька (Імпульсний режим)	Низька

3.	Гнучкість налаштування (Software Defined)	Висока (Оновлення ПЗ змінює параметри лікування)	Низька (Жорстка апаратна логіка)	Низька (Фіксовані картриджі)	Низька
4.	Собівартість виробництва	Низька (Використання серійних МК STM32)	Висока (Складна аналогова база)	Дуже висока	Низька
5.	Клінічна доказова база	Низька (Стадія розробки та тестування)	Дуже висока (Роки досліджень)	Дуже висока (FDA clearance)	Низька
6.	Портативність та габарити	Висока (Відсутність масивних радіаторів)	Низька (Стаціонарні блоки)	Середня	Висока

Результати аналізу таблиці 5.2 демонструють, що проект має чітко виражені технічні переваги, пов'язані з використанням сучасної елементної бази та цифрових алгоритмів обробки сигналів. Сильними сторонами є енергоефективність, спектральна чистота випромінювання та гнучкість налаштувань, що дозволяє реалізовувати складні протоколи лікування без зміни апаратної частини. Слабкою стороною очікувано є відсутність тривалої історії клінічних випробувань та впізнаваності бренду, що є типовим для стартапів на ранній стадії. Нейтральна позиція щодо собівартості у порівнянні з дешевими китайськими аналогами пояснюється використанням якісних компонентів (STM32, HV7360), які є дорожчими за найпростіші рішення, але значно дешевшими за професійні європейські системи.

Для підтвердження реалістичності впровадження проекту необхідно провести технологічний аудит, який передбачає оцінку наявності та доступності необхідних технологій. Успішна реалізація задуманого

функціоналу залежить від можливості використання конкретних апаратних та програмних рішень.

Таблиця 5.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Цифрова генерація ультразвукового сигналу складної форми (Sinc)	Технологія прямого цифрового синтезу (DDS) з використанням високошвидкісних ЦАП та DMA мікроконтролерів серії STM32G4	Технологія наявна, реалізована у серійних мікроконтролерах	Доступна авторам, використана при розробці макету в магістерській дисертації ¹
2.	Високоєфективне підсилення сигналу без спотворень спектру	Використання інтегральних високовольтих драйверів (наприклад, HV7360) у паралельному включенні для зменшення вихідного імпедансу	Технологія наявна, компоненти випускаються серійно	Доступна, компоненти присутні на ринку електронних компонентів ¹
3.	Формування прямокутного спектру випромінювання	Алгоритми цифрової обробки сигналів (DSP), попередня корекція форми імпульсу	Алгоритми відомі, програмні бібліотеки існують	Доступна, автори володіють необхідними навичками програмування
	Обрана технологія реалізації ідеї проекту:	Реалізація апаратної частини на базі мікроконтролера STM32G474 та драйвера HV7360 з використанням програмних		

		алгоритмів синтезу Sinc- сигналу.		
--	--	---	--	--

Проведений технологічний аудит (табл. 5.3) дозволяє зробити висновок про повну технологічну здійсненність ідеї проекту. Всі ключові компоненти, такі як мікроконтролери з необхідною швидкодією ЦАП та високовольтні драйвери, є комерційно доступними. Авторами проекту в ході виконання магістерської дисертації вже проведено попереднє моделювання та макетування, що підтверджує працездатність обраного технологічного шляху. Використання стандартної елементної бази знижує ризики, пов'язані з виробництвом, та спрощує масштабування.

5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Ефективне виведення нового продукту на ринок неможливе без глибокого розуміння ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та існуючої конкуренції. Аналіз ринкових можливостей дозволяє виявити найбільш перспективні ніші, оцінити потенційний попит та розробити стратегії мінімізації ризиків.

Початковим етапом маркетингового дослідження є попередня характеристика потенційного ринку, що включає оцінку його обсягу, динаміки та основних гравців. Ринок апаратної косметології характеризується стійким зростанням, обумовленим глобальними демографічними трендами та підвищенням уваги до якості життя.

Таблиця 5.4 - Попередня характеристика потенційного ринку
стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	Ринок представлений близько 15 великими міжнародними корпораціями (Lumenis, Alma Lasers, BTL, Merz) та значною кількістю локальних виробників, особливо в азійському регіоні.

2	Загальний обсяг продажів, млрд. дол. США	Глобальний ринок пристроїв для естетичної медицини оцінюється у понад 15 млрд. доларів США із тенденцією до зростання. Частка ультразвукових технологій становить вагомую частину цього обсягу. [21]
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Ринок зростає. Спостерігається стабільний попит на неінвазивні процедури, що стимулює розвиток технологій та появу нових пристроїв.
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Бар'єри входу є високими. Основними обмеженнями є необхідність отримання медичної сертифікації (наприклад, відповідність Технічним регламентам в Україні, СЕ в Європі), патентування технологій та значні витрати на R&D.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Продукція повинна відповідати міжнародним стандартам безпеки медичного обладнання (серія ІЕС 60601), вимогам електромагнітної сумісності та біосумісності матеріалів. [24]
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Рентабельність у секторі виробництва високотехнологічного медичного обладнання є високою і може досягати 30-50%, особливо за рахунок сервісного обслуговування та післяпродажної підтримки.

Аналіз даних таблиці 5.4 свідчить про привабливість ринку з точки зору потенційного прибутку та зростаючого попиту. Середня норма рентабельності в галузі значно перевищує банківські відсотки на вкладення, що робить інвестування у цей сектор економічно доцільним. Однак, наявність високих вхідних бар'єрів у вигляді сертифікації та жорсткої конкуренції вимагає ретельного планування та наявності чіткої стратегії диференціації продукту.

Наступним кроком є сегментація ринку та детальна характеристика потенційних груп клієнтів. Розуміння специфічних потреб та особливостей поведінки кожної групи дозволяє адаптувати продукт та маркетингову комунікацію для досягнення максимального ефекту.

Таблиця 5.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Надання якісних косметологічних послуг з високою маржинальністю	Приватні косметологічні кабінети, салони краси, клініки естетичної медицини (B2B сегмент)	Рішення про покупку приймається раціонально, на основі розрахунку окупності інвестицій. Важливими факторами є надійність, наявність сервісу, навчання персоналу та маркетингова підтримка від виробника.	- Висока надійність та ресурс роботи; - Ефективність, підтверджена протоколами; - Швидка окупність; - Ергономічність та зручність у роботі; - Престижний зовнішній вигляд.
2.	Підтримка молодості та здоров'я шкіри в домашніх умовах	Індивідуальні користувачі, переважно жінки та чоловіки віком 30+, які цінують час та приватність (B2C сегмент)	Рішення про покупку часто має емоційне забарвлення, великий вплив мають відгуки та рекомендації лідерів думок. Чутливі до ціни, простоти використання та безпеки.	- Абсолютна безпека використання; - Простота інтерфейсу ("одна кнопка"); - Компактність та мобільність; - Естетичний дизайн; - Доступна ціна.
3.	Лікування дерматологічних захворювань та реабілітація	Реабілітаційні центри, дерматологічні відділення лікарень	Орієнтовані виключно на терапевтичний результат та доказову медицину. Вимагають суворості	- Точність дозування впливу; - Можливість гнучкого налаштування параметрів;

			відповідності стандартам та наявності всіх дозвільних документів.	- Гігієнічність та можливість стерилізації.
--	--	--	---	---

Після визначення цільових сегментів проводиться комплексний аналіз факторів зовнішнього середовища, що можуть вплинути на реалізацію проекту. Для цього складаються таблиці факторів загроз та можливостей. Це дозволяє розробити превентивні заходи для мінімізації ризиків та стратегії використання сприятливих умов.

Таблиця 5.6 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Жорстке державне регулювання	Складність, тривалість та висока вартість процедур сертифікації медичних виробів. Ризик змін у законодавстві, що можуть ускладнити вихід на ринок.	Залучення кваліфікованих консультантів з регуляторних питань на ранніх етапах. Розробка технічної документації з урахуванням вимог стандартів.
2.	Висока конкуренція	Наявність на ринку відомих світових брендів з великими маркетинговими бюджетами та лояльною клієнтською базою.	Фокусування на унікальних технічних перевагах (Sinc-технологія), нішева спеціалізація, агресивний цифровий маркетинг.
3.	Технологічні ризики	Швидке моральне старіння технологій, поява нових, більш ефективних методів лікування.	Закладення можливості програмного оновлення функціоналу пристрою, постійний моніторинг наукових розробок.
4.	Економічна нестабільність	Зниження купівельної спроможності населення, коливання курсів валют, що впливає на вартість імпортованих комплектуючих.	Локалізація виробництва, створення запасу компонентів, розробка гнучкої цінової політики та програм розстрочки.

5.	Порушення ланцюгів постачання	Дефіцит електронних компонентів (мікроконтролерів) на світовому ринку.	Диверсифікація постачальників, використання поширених уніфікованих компонентів.
----	-------------------------------	--	---

Таблиця 5.7 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зростання попиту на неінвазивні процедури	Загальносвітовий тренд на збереження природної краси та відмова від травматичних операцій збільшує попит на апаратні методики.	Акцентування в маркетинговій комунікації на безпечності, безболісності та відсутності періоду реабілітації.
2.	Розвиток сегменту "Home Beauty"	Збільшення інтересу споживачів до професійного догляду вдома, особливо в умовах обмеженого доступу до салонів.	Розробка спеціальної версії пристрою для домашнього використання, створення навчальних матеріалів та онлайн-підтримки.
3.	Державна підтримка інновацій	Можливість отримання грантового фінансування для стартапів у сфері MedTech.	Активна участь у грантових програмах, конкурсах стартапів, співпраця з інкубаторами.
4.	Доступність компонентної бази	Розвиток мікроелектроніки робить високопродуктивні контролери доступними за ціною, що знижує собівартість виробу.	Використання сучасних масових компонентів для забезпечення оптимального співвідношення ціни та функціональності.
5.	Цифровізація медицини	Тренд на використання "розумних" пристроїв, інтегрованих з мобільними додатками та хмарними сервісами.	Розробка мобільного додатку для керування пристроєм, збору статистики та персоналізації процедур.

Важливим етапом стратегічного планування є аналіз конкурентного середовища. Розуміння природи конкуренції дозволяє обрати правильні

інструменти боротьби за частку ринку. Аналіз проводиться за ступеневою методикою, що охоплює різні рівні конкурентної взаємодії.

Таблиця 5.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції	Монополістична конкуренція. На ринку присутня велика кількість продавців, що пропонують диференційований товар.	Необхідність чіткого позиціонування та диференціації продукту. Конкуренція відбувається не лише за ціною, але й за якістю, функціоналом та брендом.
2. За рівнем конкурентної боротьби	Міжнародна конкуренція. На локальному ринку присутні глобальні гравці.	Орієнтація на світові стандарти якості з самого початку розробки. Необхідність врахування глобальних трендів.
3. За галузевою ознакою	Міжгалузева та внутрішньогалузева. Конкуренція як з виробниками УЗ-апаратів, так і з виробниками лазерів, RF-систем.	Акцент на унікальних перевагах саме ультразвукової технології (глибина проникнення, безпека) порівняно з іншими фізичними методами впливу.
4. Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова. Конкуренція між різними моделями та поколіннями апаратів.	Постійне оновлення модельного ряду, вдосконалення характеристик, розробка унікального дизайну.
5. За характером конкурентних переваг	Нецінова конкуренція. Боротьба за якість результату, безпеку, зручність та сервіс.	Інвестиції в R&D, клінічні дослідження, навчання користувачів, побудова сильного бренду та репутації.
6. За інтенсивністю	Висока інтенсивність. Ринок динамічний, гравці активні.	Швидка реакція на зміни ринку, гнучкість стратегії, активна маркетингова політика.

Для глибшого розуміння сил, що діють на ринку, проводиться аналіз за моделлю 5 сил М. Портера. Це дозволяє оцінити привабливість галузі та визначити ключові загрози з боку різних учасників ринкових відносин. [23]

Таблиця 5.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Характеристика	Виробники професійного косметологічного обладнання (Wellcomet, Merz). Висока інтенсивність боротьби за клієнта.	Технологічні гіганти, що можуть вийти на ринок MedTech. Стартапи з альтернативними технологіями.	Виробники електронних компонентів (STMicroelectronics, Microchip). Мають середню силу впливу через можливість дефіциту.	Клініки, салони, індивідуальні споживачі. Мають високу силу через широкий вибір пропозицій на ринку.	Ін'єкційні методики, пластична хірургія, лазерні технології, RF-ліфтинг. Загроза висока.
Висновки:	Необхідність постійних інновацій для утримання позицій.	Високі бар'єри входу (сертифікація) захищають від швидкої появи нових гравців.	Необхідність формування складських запасів та довгострокових контрактів.	Необхідність побудови програм лояльності, навчання та якісного сервісу.	Позиціонування як безпечної та комфортної альтернативи інвазивним методам.

На основі проведеного аналізу визначаються ключові фактори конкурентоспроможності, які будуть покладені в основу стратегії просування продукту.

Таблиця 5.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ефективність та безпека процедури	Використання унікальної форми сигналу (Sinc) забезпечує максимальний

		терапевтичний ефект без побічних явищ, що є критичним для медичного обладнання.
2.	Ціна та вартість володіння	Зниження собівартості за рахунок цифрових технологій дозволяє запропонувати конкурентну ціну, роблячи апарат доступним для ширшого кола клієнтів.
3.	Функціональність та гнучкість	Можливість програмного оновлення та розширення функціоналу подовжує життєвий цикл виробу та підвищує його цінність.
4.	Ергономіка та дизайн	Компактність, зручність у використанні та сучасний дизайн є важливими факторами вибору, особливо в сегменті естетичної медицини.

Далі проводиться порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту відносно ключових конкурентів за визначеними факторами. Це дозволяє кількісно оцінити конкурентну позицію.

Таблиця 5.11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін
«DermaSinc»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20 (Вага фактора)	Рейтинг товарів- конкурентів у порівнянні з LDM-MED (Wellcomet)
			-3 -2 -1 0 +1 +2 +3
1	Ефективність та безпека	20	+1 (За рахунок точного цифрового контролю спектру)
2	Ціна	15	+3 (Значно нижча собівартість завдяки цифровій базі)
3	Функціональність	15	+2 (Гнучкість налаштувань, оновлення ПЗ)
4	Впізнаваність бренду	10	-3 (Новий бренд проти відомого світового лідера)

5	Сервісна мережа	10	-2 (Мережа обслуговування на етапі формування)
---	-----------------	----	--

Фінальним етапом аналізу ринкових можливостей є SWOT-аналіз, який узагальнює всі виявлені фактори та дозволяє сформулювати стратегічні альтернативи.

Таблиця 5.12 - SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
- Інноваційна технологія цифрового синтезу; - Висока енергоефективність та спектральна чистота; - Низька собівартість виробництва; - Гнучкість налаштувань та можливість оновлення ПЗ; - Компактність та мобільність пристрою.	- Відсутність історії бренду та репутації на ринку; - Обмежені фінансові ресурси для маркетингу; - Відсутність власної виробничої бази; - Необхідність проходження тривалих процедур сертифікації; - Залежність від команди розробників.
Можливості	Загрози
- Зростаючий ринок естетичної медицини; - Вихід на нові географічні ринки; - Розширення лінійки продуктів (домашні пристрої); - Отримання грантової підтримки та інвестицій; - Партнерство з клініками та дистриб'юторами.	- Зміни у законодавстві та регуляторній політиці; - Поява технологічних аналогів у конкурентів; - Економічні кризи та зниження попиту; - Демпінг з боку конкурентів; - Проблеми з постачанням комплектуючих.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки, з яких обирається найбільш оптимальна з точки зору ресурсів та ризиків.

Таблиця 5.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Стратегія "Bootstrap" (Самостійний розвиток). Поступний розвиток за рахунок власних коштів та реінвестування прибутку. Початок з локального ринку та B2B сегменту.	Середня (залежить від початкових продажів)	12-18 місяців до виходу на стабільність
2.	Залучення венчурних інвестицій. Швидкий вихід на ринок, агресивний маркетинг, масштабування виробництва.	Низька (висока конкуренція за капітал)	6-9 місяців
3.	Партнерство / Ліцензування. Співпраця з великим виробником або дистриб'ютором, продаж технології.	Середня (за наявності захищеної інтелектуальної власності)	9-12 місяців

Враховуючи специфіку стартапу та обмеженість початкових ресурсів, найбільш доцільною є **Альтернатива №1** з елементами партнерства. Це дозволить зберегти контроль над проектом, напрацювати репутацію та мінімізувати фінансові ризики на початковому етапі.¹

5.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту

Розробка ринкової стратегії починається з визначення цільових сегментів ринку, на яких компанія планує зосередити свої зусилля. Враховуючи універсальність технології, доцільно використовувати стратегію диференційованого маркетингу, пропонуючи адаптовані рішення для різних груп споживачів.

Таблиця 5.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Приватні косметологи та невеликі салони краси. Шукають надійне та доступне обладнання для розширення спектра послуг.	Висока. Зацікавлені у швидкій окупності та ефективності .	Високий. Сегмент є масовим та динамічним.	Висока (китайські аналоги), але є попит на якісний сервіс.	Середня. Потрібна довіра до постачальника.
2.	Клініки естетичної медицини. Орієнтовані на преміум-сегмент, вимагають сертифікації та навчання.	Середня. Консервативні, вимагають доказів ефективності .	Середній. Закупівлі планові.	Висока (світові бренди).	Низька. Високі вимоги до репутації.
3.	Індивідуальні користувачі (Home Use). Люди, що піклуються про себе вдома.	Висока. Зростаючий тренд домашнього догляду.	Дуже високий. Потенційно найбільший ринок.	Середня. Багато гаджетів низької якості.	Висока. Потрібен ефективний онлайн-маркетинг.
	Які цільові групи обрано:	Група 1 як основна для старту (найкраще співвідношення попиту та			

		бар'єрів входу) та Група 3 як перспектива для масштабування.			
--	--	---	--	--	--

Для обраних сегментів формується базова стратегія розвитку. В умовах неможливості конкурувати за ціною з масовим китайським виробництвом, обирається стратегія диференціації.

Таблиця 5.15 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Самостійний вихід на ринок з фокусом на інноваційність	Диференційований маркетинг	- Унікальна технологія "Digital Sinc Wave"; - Висока безпека та комфорт процедури; - Інтелектуальне керування.	Стратегія диференціації. Створення унікального продукту, який сприймається ринком як технологічно досконаліший та безпечніший, що дозволяє обґрунтувати ціну.

Наступним кроком є визначення стратегії конкурентної поведінки. Проект виходить на ринок, де вже існують сильні гравці, тому стратегія прямої атаки є ризикованою.

Таблиця 5.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристик и товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні, технологія відома, але є інновація у способі генерації сигналу.	Стратегія змішана: залучення нових клієнтів (через безпеку) та переманювання існуючих (через ефективність).	Ні, пропонується принципово нова цифрова архітектура замість аналогової.	Стратегія "нішера" (спеціалізація). Фокусування на сегменті "розумної" косметології, пропонуючи продукт з унікальним набором характеристик.

Важливим елементом маркетингової стратегії є позиціонування продукту, яке формує його сприйняття у свідомості споживача.

Таблиця 5.17 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Ефективність, Безпека, Інноваційність.	Диференціація	Цифрова точність, спектральна чистота, відсутність болю.	1. "Digital Precision" (Цифрова точність) - гарантія результату. 2. "Safe & Painless" (Безпечно та

				безболісно) - комфорт пацієнта. 3. "Smart Technology" (Розумні технології) - сучасний підхід.
--	--	--	--	---

Розробка маркетингової програми (Marketing Mix) конкретизує стратегію. Першим елементом є продуктова стратегія.

Таблиця 5.18 - Визначення ключових переваг концепції
потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Омолодження та регенерація шкіри	Покращення якості шкіри, ліфтинг, усунення дефектів без хірургії.	Використання Sinc- сигналу забезпечує точне попадання в "терапевтичне вікно" без побічного нагріву, характерного для звичайного ультразвуку.
2.	Комфорт під час процедури	Відсутність болю та необхідності в анестезії.	Плавне наростання та спад сигналу (цифрова обвідна) виключає неприємні відчуття.

3.	Зручність експлуатації	Мобільність, простота налаштування.	Компактність завдяки відсутності громіздкого охолодження, інтуїтивний інтерфейс.
----	------------------------	-------------------------------------	--

Трирівнева модель товару дозволяє деталізувати пропозицію для клієнта.

Таблиця 5.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Апарат для безпечної та ефективної регенерації шкіри за допомогою інноваційної технології цифрового ультразвуку.
II. Товар у реальному виконанні	Якість: Відповідність медичним стандартам, надійні компоненти. Властивості: Частота 10/19 МГц, форма сигналу Sinc, сенсорне керування, автономне живлення. Дизайн: Ергономічний корпус, сучасний стиль. Марка: "DermaSinc" (робоча назва). Пакування: Надійний кейс для транспортування, комплект аксесуарів.
III. Товар із підкріпленням	Сервіс: Гарантія 12-24 міс., технічна підтримка, підмінний фонд. Навчання: Відео-інструкції, вебінари для косметологів, протоколи процедур. Оновлення: Можливість оновлення прошивки для розширення функціоналу.

Цінова політика повинна забезпечувати прибутковість та бути конкурентною.

Таблиця 5.20 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	Курс RF-ліфтингу: 5-15 тис. грн. Ін'єкції: 4-10 тис. грн.	Професійні апарати (Європа): 300-600 тис. грн. Китайські: 20-80 тис. грн.	Середній та вище середнього (косметологи, що інвестують в розвиток).	Нижня межа: 15 000 грн (собівартість + маржа). Верхня межа: 80 000 грн (конкуренція з Китаєм). Рекомендована: 45 000 - 50 000 грн.

Система збуту та комунікацій завершує маркетинговий комплекс.

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Потребують консультації, навчання, демонстрації (B2B). Імпульсний попит або рекомендації (B2C).	Навчання, логістика, сервісне обслуговування, гарантія.	Однорівневий (прямі продажі) або дворівневий (через дистриб'юторів).	Комбінована: 1. Прямі продажі через сайт. 2. Партнерство з навчальними центрами для косметологів.

Таблиця 5.22 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Довіряють експертам, відгукам колег, навчальним матеріалам	Instagram, Facebook, YouTube (огляди), профільні виставки, семінари.	"Цифрова точність", "Безпека", "Інновація"	Сформувати довіру, пояснити технічні переваги простою мовою.	"DermaSinc: Інтелект цифрових технологій для вашої краси. Ефективність професійної клініки у компактному форматі."

5.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності

Успішна реалізація проекту неможлива без чіткої організації процесів та планування ресурсів. Для впровадження системи «DermaSinc» передбачається створення проектної команди, яка буде відповідати за ключові напрямки діяльності.

Команда проекту

Для реалізації стартапу необхідна команда, що поєднує технічні та бізнес-компетенції:

- 1. Керівник проекту (Project Manager):** Загальне керівництво, стратегічне планування, комунікація з інвесторами.
- 2. Технічний директор (СТО):** (Автор роботи). Розробка апаратної частини та програмного забезпечення, контроль виробництва.

3. **Медичний консультант:** Лікар-дерматолог (аутсорс). Розробка методик, тестування, валідація результатів.
4. **Маркетолог:** Просування продукту, робота з клієнтами, організація продажів.

Календарний план-графік реалізації

Проект розбивається на етапи тривалістю 12 місяців:

1. **Місяці 1-3:** R&D. Доопрацювання макету до промислового зразка (MVP). Розробка корпусу, оптимізація друкованої плати.
2. **Місяці 4-6:** Тестування та налагодження. Внутрішні випробування, доопрацювання ПЗ, підготовка технічної документації.
3. **Місяці 7-9:** Сертифікація та підготовка виробництва. Оцінка відповідності, замовлення компонентів, виготовлення пілотної партії.
4. **Місяці 10-12:** Вихід на ринок. Маркетингова кампанія, старт продажів, збір відгуків.

Фінансово-економічне обґрунтування

Оцінка економічної ефективності базується на розрахунку необхідних інвестицій та прогнозованих прибутків.

Розрахунок витрат на запуск (Сарех & Орех):

- R&D (компоненти, обладнання, прототипування): 150 000 грн. (Включає закупівлю STM32, драйверів, п'єзокераміки, виготовлення плат та корпусів).
- Сертифікація та дозвільна документація: 100 000 грн.
- Маркетинг та просування: 100 000 грн. (Сайт, реклама, участь у виставках).
- Адміністративні витрати та ФОП (на старті): 250 000 грн.

- Загальна потреба в інвестиціях: ~600 000 грн.

Прогноз доходів:

При планованій собівартості пристрою близько 7 000 грн (матеріали + збірка) та роздрібній ціні 45 000 грн, маржинальний прибуток становить 38 000 грн з одиниці.

Точка беззбитковості (покриття стартових інвестицій 600 000 грн):

$$N = 600\,000 / 38\,000 \approx 16 \text{ пристроїв.}$$

Реалізація 16 пристроїв є цілком досяжною метою протягом перших 3-6 місяців продажів, що свідчить про високу інвестиційну привабливість проекту.

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Взаємовідносини з клієнтами	Сегменти споживачів
Постачальники компонентів: Дистриб'ютори мікроелектроніки (STMicroelectronics, Microchip) для закупівлі STM32 та драйверів HV7360. Медичні партнери: Приватні дерматологічні клініки для проведення клінічних випробувань та валідації методик. Виробничі партнери: Підприємства з виготовлення друкованих плат (PCB) та корпусів. Сертифікаційні органи: Лабораторії для оцінки	R&D (Розробка): Оптимізація алгоритмів цифрового синтезу Sinc-сигналу, оновлення прошивки. Виробництво: Контроль якості, збірка вузлів, програмування мікроконтролерів. Сертифікація: Отримання дозвільної документації. Маркетинг: Просування на	Унікальна технологія: «Digital Sinc Wave» — генерація ідеально чистого спектру без побічних гармонік. Безпека: Відсутність ризику термічних опіків завдяки точному дозуванню енергії. Економічність: Вартість нижча за аналогові європейські аналоги (LDM-MED) при вищій ефективності. Ергономіка: Портативність, відсутність громіздких систем охолодження.	Персональна підтримка (B2B): Навчання персоналу клінік, надання протоколів лікування, гарантійне обслуговування. Спільнота: Створення бази знань та вебінарів для косметологів. Self-service: Доступ до оновлень ПЗ через онлайн-ресурси.	B2B (Основний): Приватні косметологічні кабінети, салони краси середнього та преміум класу, клініки естетичної медицини. B2B (Вторинний): Реабілітаційні центри (лікування рубців, відновлення шкіри). B2C (Перспектива): Індивідуальні користувачі сегменту «Home Beauty» (пристрої для домашнього догляду).
Ключові ресурси		Канали збуту		
Інтелектуальна власність: Алгоритми синтезу сигналу, код прошивки, схемотехнічні рішення. Людські ресурси: Команда інженерів-розробників, медичні консультанти. Матеріальні: Комплектуючі.		Прямі продажі: Через власний веб-сайт та Landing Page. Партнерські продажі: Через дистриб'юторів медичного обладнання. Події: Участь у спеціалізованих виставках та конференціях (InterCHARM тощо).		
Структура витрат		Потоки доходів		
Змінні витрати: Закупівля електронних компонентів (BOM), виробництво друкованих плат, збірка.		Продаж обладнання: Разовий дохід від реалізації пристроїв «DermaSinc».		

Рисунок 5.1 - Бізнес-модель «DermaSinc»

5.5 Висновок 5 розділу

У розділі «Розробка стартап-проекту» проведено комплексний аналіз перспектив комерціалізації автоматизованої системи регенерації шкіри.

1. Технологічний аудит підтвердив здійсненність ідеї створення пристрою на базі цифрового синтезу сигналів. Використання мікроконтролера STM32 та драйверів HV7360 дозволяє отримати продукт з унікальними характеристиками (спектральна чистота, енергоефективність) та низькою собівартістю.
2. Ринковий аналіз показав наявність стійкого попиту на неінвазивні методи омолодження. Ринок зростає, і незважаючи на високу конкуренцію, існує ніша для технологічних та безпечних рішень у середньому ціновому сегменті.
3. Маркетингова стратегія базується на диференціації продукту за рахунок технологічних переваг ("Digital Sinc Wave") та орієнтації на професійний сегмент малого бізнесу (приватні кабінети) з подальшим масштабуванням.
4. Економічні розрахунки свідчать про високу рентабельність проекту. Низька точка беззбитковості (16 пристроїв) робить стартап стійким до ринкових коливань та привабливим для інвесторів.

Таким чином, розроблений стартап-проект має високий потенціал для успішної реалізації, забезпечуючи вирішення актуальних проблем споживачів та економічну вигоду для розробників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] [pubmed.ncbi.nlm.nih.gov / A Review of the Use of Ultrasound for Skin Tightening, Body Contouring, and Cellulite Reduction in Dermatology](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29846343/) / Margit Juhász, Dorota Korta, Natasha Atanaskova Mesinkovska. — 2018. — Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29846343/> (дата звернення: 27.10.2025).

[2] [pubmed.ncbi.nlm.nih.gov / Efficacy and safety of intense focused ultrasound for skin rejuvenation: a systematic review and meta-analysis](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39133383/) / Ruoxin Pan, Duoduo Gu, Yue Zhang et al. — 2024. — Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39133383/> (дата звернення: 27.10.2025).

[3] [pubmed.ncbi.nlm.nih.gov / A Systematic Review of the Clinical Efficacy of Micro-Focused Ultrasound Treatment for Skin Rejuvenation and Tightening](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35003992/) / Ubaid Khan, Nabiha Khalid. — 2022. — Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35003992/> (дата звернення: 28.10.2025).

[4] [pubmed.ncbi.nlm.nih.gov / Microfocused Ultrasound in Regenerative Aesthetics: A Narrative Review on Mechanisms of Action and Clinical Outcomes](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39501429/) / Vasanop Vachiramon et al. — 2024. — Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39501429/> (дата звернення: 28.10.2025).

[5] [link.springer.com / The dual-frequency ultrasound effect on skin structure and regeneration](https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=52250) / Ilja Kruglikov. — Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications. — 2014. — Режим доступу: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=52250> (дата звернення: 28.10.2025).

[6] Терещенко М. Ф. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої / М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик, М. В. Чухраєв. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 215 с.

[7] [st.com / RM0440 Reference manual: STM32G4 Series advanced Arm®-based 32-bit MCUs](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0440-stm32g4-series-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf). — STMicroelectronics, 2020. — Режим доступу: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0440-stm32g4-series-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf (дата звернення: 30.10.2025).

[8] [microchip.com / HV7360 High Speed, +/-100V 2.5A Three-level RTZ Transmit Pulser](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005374A.pdf). — Microchip Technology Inc., 2015. — Режим доступу: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005374A.pdf> (дата звернення: 30.10.2025).

[9] [analog.com / AD9835: 50 MHz Direct Digital Synthesizer / Waveform Generator](https://www.analog.com/en/products/ad9835/). — Analog Devices, Inc. — Режим доступу:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9835.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).

[10] analog.com / AD711: Precision, Low Cost, High Speed, BiFET Op Amp. — Analog Devices, Inc. — Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD711.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).

[11] ti.com / MPY634 Wide Bandwidth Precision Analog Multiplier. — Texas Instruments. — Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/mpy634.pdf> (дата звернення: 02.11.2025).

[12] ti.com / PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus. — Texas Instruments. — Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf> (дата звернення: 02.11.2025).

[13] Лайош С. Цифрова обробка сигналів: практичний підхід / С. Лайош. — 2-ге вид. — Київ: МК-Прес, 2019. — 650 с.

[14] analog.com / A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis / Analog Devices. — 1999. — Режим доступу: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/a-technical-tutorial-on-digital-signal-synthesis.html> (дата звернення: 29.10.2025).

[15] ultherapy.com / Mechanism of Action: Micro-Focused Ultrasound with Visualization / Merz Aesthetics. — Режим доступу: <https://ultherapy.com/science-technology/> (дата звернення: 28.10.2025).

[16] sofwave.com / SUPERB™ Technology: Synchronous Ultrasound Parallel Beam / Sofwave Medical. — Режим доступу: <https://sofwave.com/technology/> (дата звернення: 28.10.2025).

[17] mdpi.com / Signal-Processing Framework for Ultrasound Compressed Sensing Data: Envelope Detection and Spectral Analysis / Yisak Kim et al. — Applied Sciences. — 2020. — Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6956> (дата звернення: 29.10.2025).

[18] pubmed.ncbi.nlm.nih.gov / Heat shock proteins in dermatology / A. W. Trautinger. — Clinical and Experimental Dermatology. — 2018. — Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11260171/> (дата звернення: 27.10.2025).

[19] <https://www.google.com/search?q=kybstatic.com> / KXO-V97T Crystal Oscillator Datasheet / Geyer Electronic. — Режим доступу: <https://www.geyer-electronic.de> (дата звернення: 01.11.2025).

[20] onsemi.com / MC1456: High Performance Operational Amplifier / ON Semiconductor. — Режим доступу:

<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc1456-d.pdf> (дата звернення: 02.11.2025).

[21] grandviewresearch.com / Aesthetic Medicine Market Size, Share & Trends Analysis Report. — 2024. — Режим доступу: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/medical-aesthetics-market> (дата звернення: 03.11.2025).

[22] Бланк С. Стартап: Настільна книга засновника / Стів Бланк, Боб Дорф. — Київ: Наш Формат, 2018. — 616 с.

[23] Портер М. Конкурентна стратегія: Методики аналізу галузей і конкурентів / Майкл Портер. — Київ: Наш Формат, 2020. — 456 с.

[24] zakon.rada.gov.ua / Технічний регламент щодо медичних виробів: затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 2 жовтня 2013 р. № 753. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/753-2013-%D0%BF> (дата звернення: 03.11.2025).

[25] st.com / AN4566: Extending the DAC performance of STM32 microcontrollers / STMicroelectronics. — 2017. — Режим доступу: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00129215.pdf (дата звернення: 30.10.2025).

[26] wellcomet.com / LDM®-MED: Local Dynamic Micromassage Technology / Wellcomet GmbH. — Режим доступу: <http://www.wellcomet.com> (дата звернення: 28.10.2025).

[27] Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 263 с.

[28] Комп'ютерне проектування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 419 с. "

[29] Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 180 с.

[30] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 70 с.

[31] Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.

[32] Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.

[33] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.