

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)


Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем  
(повна назва кафедри)

"На правах рукопису"

УДК 534.42

"До захисту допущено"

Завідувач кафедри

 Найда С.А.  
(ініціали, прізвище)

" 11 " травня 2021 р.


## Магістерська дисертація

спеціальність 171 Електроніка  
(код та назва спеціальності)


на тему: "Розробка та реалізація програмно-апаратного синтезатора звуку"

Виконав: студент II курсу, групи ДГ-91мн  
(шифр групи)

Шостак Станіслав Сергійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

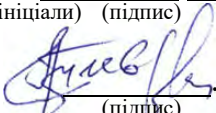
  
(підпис)

Науковий керівник професор, Продеус А. М.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент доцент каф. ЕІ, к.т.н. Шуляк О. П.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

  
(підпис)

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

Студент   
(підпис)

Київ – 2021 року

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

Факультет електроніки  
(повна назва)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (освітня програма) 171 Електроніка (Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації)

(код і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри



Найда С.А.  
(ініціали, прізвище)

11 травня 2020р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Шостак Станіславу Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Розробка та реалізація програмно-апаратного синтезатора звуку

Науковий керівник дисертації Продеус Аркадій Миколайович, професор,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від " 05 " листопада 2020р. №3241-с.

2. Строк подання студентом дисертації 10.05.2021 р.

3. Об'єкт дослідження: процеси обробки сигналів в системах синтезу звуку.

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-науковою програмою) методи програмно-апаратного синтезу звуку.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: проаналізувати методи що використовуються в синтезаторах для синтезу звуку; запропонувати рішення, що дозволить отримати унікальне тембральне наповнення звуку.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 25 рис, 23 табл., 1 презентація, слайдів

7. Орієнтовний перелік публікацій 1) 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)

8. Дата видачі завдання 10.09.2019 р.

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Написання першого розділу: " Основні способи синтезу звуку та їх алгоритми"	07.03.2021	Виконано
2	Написання другого розділу: " Реалізація алгоритмів синтезу на мікроконтролері Axoloti Core"	01.04.2021	Виконано
3	Написання третього розділу: "Розробка синтезатора на основі мікроконтролера Axoloti Core"	20.04.2021	Виконано
4	Написання четвертого розділу: "Розробка стартап проекту"	05.05.2021	Виконано
5	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	07.05.2021	Виконано
6	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	10.05.2021	Виконано

Студент



(підпис)

С. С. Шостак

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи



(підпис)

.А. М. Продеус

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Розробка та реалізація програмно-апаратного синтезатора звуку.

Магістерська дисертація: 93 с., 23 табл., 45 рис., 1 дод., 37 джерел.

Ключові слова: СИНТЕЗ ЗВУКУ, СИНТЕЗАТОР, АТРАКТОР ЛОРЕНЦА, МІКРОКОНТРОЛЕР

### **Актуальність теми:**

Розвиток музичних жанрів за останні 20 років сприяв розповсюдженню експериментальної музики [1]. Як і у випадку з «музичним авангардом», термін «експериментальна музика» часто використовується для характеристики радикальних композиторів і їх робіт [2]. Деякі музикознавці проводять межу між авангардом і експериментальною музикою з точки зору їх співвідношення з євроцентричною музичною традицією. На їхню думку, в найзагальнішому вигляді, авангардна музика займає екстремальні позиції в межах традиції, в той час як експериментальна музика лежить за її межами [2].

Термін «експериментальна музика» використовується в музичній критиці для характеристики зразків тієї нової музики, естетика якої явно порушує існуючі в музичному мистецтві традиційні норми і правила. Для експериментальної музики характерне використання дисонансів, шумів [1] та елемента перформансу [3]: коли звучання викликає короткі та інтенсивні емоції. Експериментальна музика більш хаотична ніж інша електронна музика. В наші дні елементи експериментальної музики та перформансу запозичуються більш популярними музичними жанрами. Тож є потреба у створенні інструменту який буде призначеним для експериментальної музики і створюватиме відповідне звучання.

**Метою дослідження** є розробка програмно-апаратної реалізації синтезатора звуку на основі мікроконтролера Axoloti Core, що створюватиме унікальне тембральне наповнення звуку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Дослідити основні способи синтезу звуку та їх алгоритми. Дослідити допоміжні засоби модифікації синтезованого звуку;
- Дослідити способи реалізації алгоритмів синтезу звуку на мікроконтролері Axoloti Core. Вибрати найбільш ефективні методи синтезу звуку для вирішення поставленої задачі.
- Розробити програмно-апаратну реалізацію синтезатора звуку на основі мікроконтролера Axoloti Core, з використанням досліджених алгоритмів синтезу.
- Розробити рішення для надання унікальності звучання розробленого синтезатора.

**Об'єкт дослідження:** процеси обробки сигналів в системах синтезу звуку.

**Предмет дослідження:** методи програмно-апаратного синтезу звуку.

**Методи дослідження:** Теоретичний огляд основних способів синтезу звуку та їх алгоритмів. Програмна реалізація алгоритмів синтезу звуку на мікроконтролері Axoloti Core. Аналіз спектральних характеристик сигналів записаних з аудіовиходу мікроконтролера при використанні розглянутих алгоритмів. Виявлення переваг та недоліків використання розглянутих алгоритмів синтезу звуку на даній платформі. Використання атрактору Лоренца для можливості частотної модуляції для створення унікальності звучання розробленого синтезатора. Аналіз впливу атрактору Лоренца на спектральні характеристики сигналу.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у створенні прототипу синтезатора звуку на основі мікроконтролера Axoloti Core, з використанням атрактору Лоренца, що створюватиме унікальне тембральне наповнення звуку.

## SUMMARY

Master's dissertation: 92 p., 23 tables., 45 fig., 1 attachment, 37 sources.

The aim of the research is to develop a software and hardware implementation of a sound synthesizer based on the Axoloti Core microcontroller, which will create a unique timbre content.

Research methods: Theoretical review of the main methods of sound synthesis and their algorithms. Software implementation of sound synthesis algorithms on the Axoloti Core microcontroller. Analysis of the spectral characteristics of the signals recorded from the audio output of the microcontroller using the considered algorithms. Identifying the advantages and disadvantages of using the considered algorithms for sound synthesis on this microcontroller. Using the Lorenz attractor for the frequency modulation to create a unique sound of the developed synthesizer. Analysis of the influence of the Lorenz attractor on the spectral characteristics of the signal.

The practical significance of the obtained results is to create a prototype of a sound synthesizer based on the Axoloti Core microcontroller, using a Lorenz attractor, which will create a unique timbre content.

SOUND SYNTHESIS, SYNTHESIZER, LORENZ ATTRACTOR,  
MICROCONTROLLER

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 ОСНОВНІ СПОСОБИ СИНТЕЗУ ЗВУКУ ТА ЇХ АЛГОРИТМИ .....	14
1.1. Адитивний синтез .....	14
1.2. Субтрактивний синтез.....	16
1.2.1. Осцилятор .....	17
1.2.2. Фільтр .....	18
1.2.3. Підсилювач, керований напругою .....	19
1.3. Застосування модуляції в синтезі звуку.....	19
1.3.1 Амплітудна модуляція.....	21
1.3.2. Частотна та фазова модуляція .....	22
1.4. Синтез звуку методом Waveshaping.....	24
1.4.1 Використання поліномів як передавальної функції.....	25
1.4.2. Синтез за допомогою кривих Безьє .....	26
1.5. Алгоритм Карплуса - Стронга .....	28
1.6. Таблично хвильовий синтез (Wavetable).....	30
1.7 Застосування ефектів у синтезі звуку.....	32
1.7.1 Ефекти що використовують зміни в часовій області.....	33
1.7.2 Ефекти що використовують модуляцію.....	34
1.8 Фільтри.....	35
1.9 Підсилення та компресія.....	35
1.10 Stereo та панорамування.....	36
1.11 Застосування огинаючої.....	36
1.11.1 Генератори Огинаючої ADSR.....	37
1.11.2 Осцилятор низьких частот (LFO).....	39
1.11.3 Нестандартні методи огинаючої.....	39
1.12 Пристрої керування синтезатором.....	40
1.13 Матриця модуляції.....	41
1.14 Змішане використання методів синтезу.....	42
2 РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ СИНТЕЗУ НА МІКРОКОНТРОЛЕРІ AXOLOTI CORE.....	44
2.1. Характеристики мікроконтролеру .....	44
2.2. Створення найпростішого синтезатора у середовищі Axoloti Patcher.....	45
2.3 Створення патча з використанням генератора обвідної.....	50
2.4 Реалізація алгоритму субтрактивного синтезу на мікроконтролері Axoloti Core.....	52

2.5 Реалізація алгоритму адитивного синтезу на мікроконтролері Axoloti Core .....	54
2.6 Реалізація алгоритму синтезу фазової модуляції на мікроконтролері Axoloti Core.....	57
2.7 Використання LFO для синтезу звуку.....	59
2.8 Синтез звуку за допомогою алгоритма Карплуса — Стронга.....	62
2.9 Реалізація синтезу звуку методом таблично хвильового синтезу.....	64
2.10 Порівняння реалізацій методів синтезу на Axoloti Core.....	68
3 РОЗРОБКА СИНТЕЗАТОРА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА AXOLOTI CORE.....	69
3.1.Способи апаратної реалізації синтезатора звуку на основі мікроконтролера Axoloti Core.....	69
3.2 Використання атрактора Лоренца для частотної модуляції.....	71
3.3 Програмна реалізація синтезатора звуку на основі мікроконтроллера Axoloti Core.....	74
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ.....	80
4.1 Опис ідеї проєкту.....	80
4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту.....	80
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	81
4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту.....	84
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту.....	85
ВИСНОВКИ.....	87
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	88
ДОДАТОК А. ABSTRACT.....	92



## Перелік скорочень

AM - Amplitude modulation - Амплітудна модуляція

PM - phase modulation - Фазова модуляція

FM - frequency modulation - Фазова модуляція

LFO - Low Frequency Oscillator - Осцилятор низьких частот

VCA - Voltage Controlled Amplifier - Підсилювач, що керується напругою

OSC - Oscillator - Осцилятор

VCF - Voltage Controlled Filter - Фільтр що керується напругою

ФНЧ - Фільтр низьких частот

ФВЧ - Фільтр високих частот

РФ - Режекторний фільтр

СФ - Смуговий фільтр

## ВСТУП

В історії музики інструменти мають дуже важливе значення тому що нові інструменти здатні змінити спосіб аранжування, створення і виконання композиції, здатні мати унікальне звучання. Так синтезатори змінили звучання існуючих музичних жанрів та створили багато нових жанрів.

RCA Electronic Music Synthesizer був першим програмованим електронним синтезатором створеним в Центрі електронної музики Колумбії-Прінстона. Розроблений Гербертом Білорусь і Гаррі Олсон в RCA, він був встановлений в Колумбійському університеті в 1957 році.

В кінці 1950-х інженер Євген Мурзін сконструював перший у світі багатоголосий синтезатор, який отримав назву «АНС» - на честь композитора Олександра Миколайовича Скрябіна. Принцип його дії заснований на оптичному записі звуку, що використовували в кіноіндустрії. У 1960-і і 1970-і роки АНС використовувався для запису саундтреків до художніх і документальних фільмів на космічні теми. Створював саундтреки до фільмів, головним чином, Едуард Артем'єв (наприклад, чудовий "Соляріс" Андрія Тарковського).

Перший модульний синтезатор створив Дон Букла, ще до Роберта Муга - в 1963 році. Інструмент був побудований на грант, отриманий від Фонду Рокфеллера; його продажі почалися тільки в 1966 році, через рік після того, як був проданий перший Moog Modular. Букла все життя прагнув створювати щось нове, що відрізняється від того, що робили інші. Він не любив, коли його інструменти називали "синтезаторами", і прагнув і до зовнішньої, і до внутрішньої унікальності своїх розробок. У його ранніх інструментів була відсутня клавіатура, замість неї пропонувалося використовувати чутливі до торкання пластини, які зовсім не обов'язково повинні були бути прив'язані до однієї і тієї ж ноти. Він також активно експериментував з методами звукогенерації - його підхід радикально відрізняється від того, що робили Муг, Перлман і інші.

Роберт Муг ще одне ім'я, без якого неможливо скласти цілісну картину про епоху електронної музики. У 1953 році, у віці 19-ти років, Муг заснував свою першу компанію «R. A. Moog Co». Розробляти синтезатор Муг почав в Принстон-центрі Колумбійського університету (зараз він називається Центр комп'ютерної музики - Computer Music Center). Спільно з композитором Гербертом Дойчем він розробив електронний генератор, керований напругою, генератор ADSR-обвідної та інші модулі для синтезатора і в шістдесятих вже продавав їх від імені своєї компанії. Спочатку ця технологія синтезатора, цікавила лише композиторів-авангардистів, але протягом 1960-х років, коли Моог (та інші виробники) вдосконалювали можливості синтезатора, їх звуки почали лунаати на поп-платівках. Вони часто виконували роль вигадливого електричного органу або використовувались для спецефектів. Помітне раннє використання модуля Моог відбулося у "Бітлз" на платівці "Here Comes the Sun".

Однак лише коли Венді Карлос випустила платівку "Switched-on Bach" у 1968 році, що продавалася краще за інші, було визнано потенціал синтезаторів як справжніх музичних інструментів. Цей запис був реконструкцією творів Дж. С. Баха за допомогою модульного синтезатора Моог. Ця платівка змінила світосприйняття того, якою може бути електронна музика та як синтезатори можуть бути використані для справжньої музичної виразності. Жоден список впливових синтезаторів не був би повним без Moog Minimoog Model D, мабуть, найвідомішого синтезатора всіх часів. Він представляє перехід від модульних синтезаторів розміром з шафу 1960-х до портативних конструкцій "все в одному" 1970-х, які пропонували клавіатуру з ручками та повзунками в одному зручному, автономному корпусі. Замінивши нескінченну складність та патч-кабелі модулів на перемикачі та повзунки, дизайн Minimoog задав стандартну схему для наступного покоління аналогічно розроблених портативних аналогових синтезаторів - ARP Odyssey, Sequential Circuits Pro One, Teisco 100F, Yamaha SY-1. Звичайно, це не мало б успіху, якби синтезатор не звучав чудово, але його три осцилятори та знаменитий фільтр Моог подбали про це. Хоча його звучання можна було б

вважати звучанням "стандартного аналогового синтезатора", його використовували і як басовий синтезатор. Minimoog використовували у своїй творчості Pink Floyd, Chick Corea, Bob Marley і Kraftwerk.

Вплив Roland TB-303 на еволюцію танцювальної музики, величезний, так як він заклав основи сучасної електронної музики. Фактично за допомогою цього інструменту був створений новий жанр, який називається "acid house". TB-303 був розроблений як компактний басовий синтезатор для використання на групових тренуваннях. Але в цій області використання синтезатор зазнав краху. Гори небажаних TB-303 накопичилися у музичних магазинах для вживаних товарів світу, але в Чикаго їх недорого купували ді-джеї та продюсери, які прагнули створити новий музичний стиль "house", який швидко став популярним на початку 1980-х. Звучання TB - 303 досі зустрічається у багатьох жанрах і мабуть, буде зустрічатися і надалі.

Розвиток музичних жанрів за останні 20 років сприяв розповсюдженню експериментальної музики[1]. Як і у випадку з «музичним авангардом», термін «експериментальна музика» часто використовується для характеристики радикальних композиторів і їх робіт [2]. Деякі музикознавці проводять межу між авангардом і експериментальною музикою з точки зору їх співвідношення з євроцентричною музичною традицією. На їхню думку, в найзагальнішому вигляді, авангардна музика займає екстремальні позиції в межах традиції, в той час як експериментальна музика лежить за її межами [2].

Термін «експериментальна музика» використовується в музичній критиці для характеристики зразків цієї нової музики, естетика якої явно порушує існуючі в музичному мистецтві традиційні норми і правила. Для експериментальної музики характерне використання дисонансів, шумів [1] та елементу перформансу [3]: коли звучання викликає короткі та інтенсивні емоції. Експериментальна музика більш хаотична ніж інша електронна музика. В наші дні елементи експериментальної музики та перформансу запозичуються більш популярними музичними жанрами.

Тож є потреба у створенні інструменту який буде призначеним для експериментальної музики і створюватиме відповідне звучання.

# 1 ОСНОВНІ СПОСОБИ СИНТЕЗУ ЗВУКУ ТА ЇХ АЛГОРИТМИ

## 1.1 Адитивний синтез

При адитивному синтезі елементарні гармоніки підсумовуються між собою в більш складну форму сигналу. Компонентні форми хвиль зазвичай прості, хоча можуть бути використані хвилі з формами будь-якої складності. Традиційно використовують синусоїдальні компоненти, щоб мати точний контроль над (не) гармонічним вмістом результуючого спектра. Рисунок 1 на показує просту схему адитивного синтезу з  $N$  генераторами синусоїдальної форми, кожен з яких має входи для частоти, амплітуди та фази. Виходи генератора підсумовуються і масштабуються таким чином, щоб максимальна амплітуда композитного звуку дорівнювала  $A_{max}$ .

Якщо входи осцилятора  $F_k$ ,  $A_k$  та  $\Theta_k$  залишаються незмінними з плином часу, формується сингал зі статичним спектром. Цей метод може бути використаний в цифрових генераторах при генерації класичних аналогових сигналів, таких як квадратні або пилкоподібні хвилі, оскільки він пропонує спосіб точно визначити гармонійну структуру та спектральні характеристики. Алгоритм адитивного синтезу побудовано відповідно до теореми Фур'є, де будь-який періодичний сигнал може бути побудований з нескінченної суми синусоїдальних гармонік, що мають певну частоту, амплітуду та фазу. У приблизному вигляді це можна записати як [4]

$$s(n) = A_n(n) \sin\left[ \left( k\omega n + 2\pi F_k(n) + \theta_k(n) \right) \right] \quad (1)$$

де  $s(n)$  - вихідний сигнал,  $n$  - номер вибірки,  $\omega$  - основна частота радіана ноти,  $M$  - кількість генераторів,  $A_k(n)$  - амплітуда,  $F_k(n)$  частота і  $\Theta_k(n)$  фаза,  $A_n(n)$  - амплітуда. Наприклад таким чином можна отримати сигнал пилкоподібної форми як сумму 100 сигналів синусоїдальної форми, використовуючи перетворення Фур'є [5]:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{100} (-1)^{k+1} \frac{2 \sin(2\pi k f t)}{k} \quad (2)$$

Сигнал квадратної форми в такому випадку можна отримати, підсумувавши лише непарні гармоніки з амплітудами  $1/k$ .

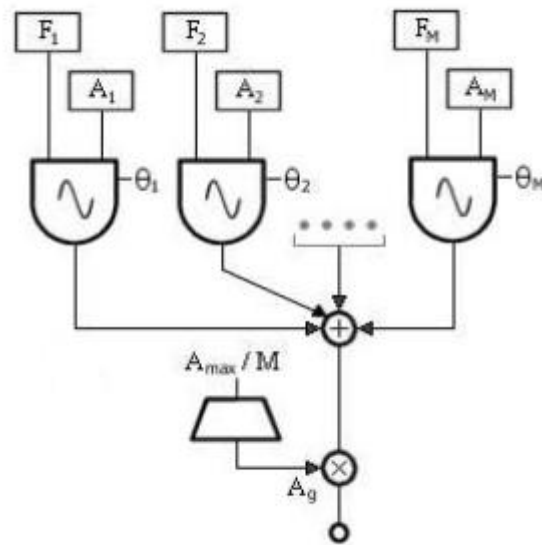


Рис. 1 Схема адитивного синтезу

При адитивному синтезі сигнали модуляції можуть бути апроксимовані лінійними або експоненційними кривими швидкості управління. Однак, використання великої кількості гармонічних компонентів, потребує великої кількості параметрів які необхідно контролювати. Щоб спростити таку задачу використовують метод, який називається груповим адитивним синтезом, він зменшує кількість контрольних параметрів, сумуючи гармоніки, що мають однакову тимчасову гучність і висоту тону, в єдину таблицю хвиль [6]. Потім ці хвильові таблиці використовуються замість простих синусоїдальних генераторів, щоб отримати більш ефективний спосіб створення складеної форми хвилі. Так працює алгоритм синтезу за допомогою хвильових таблиць що буде розглянуто у

даній дисертації далі. Іншим підходом є техніка формування хвилі, що використовується в блоках дискретизації, коли форми осциляторів є фактично складними знімками акустичних тембрів інструментів [7].

## 1.2 Субтрактивний синтез

Цей спосіб синтезу використовувався в ранніх аналогових синтезаторах. Субтрактивний синтез починається із спектрально багатого вихідного матеріалу, такого як шум, пилкоподібні або імпульсні форми хвиль. Потім бажаний вихідний сигнал формується шляхом видалення надлишкового спектрального вмісту за допомогою фільтрування і, можливо, підкреслення певних формантних частот. Компонент підсилювача в кінці сигнального ланцюга дозволяє масштабувати амплітуду (див. Рисунок. 2). У певному сенсі процес субтракції можна розглядати як елементарну модель акустичного інструменту, де генератор джерела діє як компонент збудження, а фільтр діє як резонатор.

Однак ключові сильні сторони техніки субтракції полягають не у забезпеченні переконливої емуляції звуків акустичного інструменту через надто спрощену модель збудження та резонатора. Швидше, він створює звуки, які сьогодні розглядаються як звуки, що мають власний характер, і сам став джерелом наслідування. Це також відносно інтуїтивна модель синтезу, оскільки архітектура OSC-VCF-VCA є звичним явищем навіть у цифрових синтезаторах, що використовують різні методи синтезу. Схема субтрактивного синтезу зображена на рисунку 2



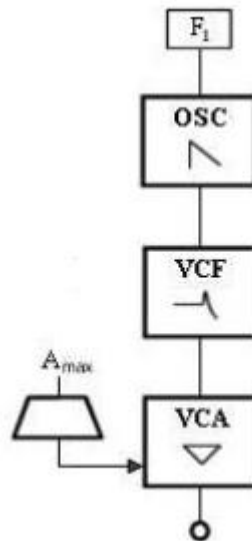


Рис.2 Блок схема субтрактивного синтезу

### 1.2.1 Осцилятор (OSC)

Вхідний матеріал виробляється одним або кількома генераторами. Аналогова схема, осцилятора не може створити будь-яку форму сигналу, яку можна собі уявити, тому основний набір хвильових осциляторів включає хвильові форми синуса, трикутника, квадрата, імпульсу (з регульованою робочою шириною), пілкоподібних та шумових хвильових форм. Вищевказані форми хвиль можуть бути створені адитивним методом, описаним вище[8].

Шумові хвилі аперіодичні тому вони можуть бути параметризовані за кількістю енергії, присутньої у певних частотних смугах, тобто пов'язані з кольором, аналогічно видимому спектру світла. Білий шум має однакову щільність потужності у всьому діапазоні частот, а інші відтінки шуму можуть генеруватися, пропускаючи його через фільтр низьких частот. У цифровій області шум може створюватися за допомогою одного з алгоритмів генератора псевдовипадкових чисел.

Якщо в розпорядженні є два осцилятори, можна додати невелику різницю між частотами їх основного тону, щоб досягти ефекту биття [9] до результуючого звуку. Кільцева модуляція та частотна модуляція також є загальноживаними методами для створення ширшої палітри тембру у вихідних сигналах.

### 1.2.2 Фільтр (VCF)

Звук, що видається субтрактивною системою, визначається здебільшого типом та якістю використовуваних фільтрів. Багато синтезаторів стали легендою або повним провалом завдяки фільтрам. Відомим прикладом є Moog з їх недосконалим, але теплим за звучанням каскадом фільтрів [10]. Взагалі, метод субтракції використовує фільтри, що працюють у чотирьох основних режимах, які можна класифікувати за властивостями частотної характеристики. Фільтр низьких частот (ФНЧ) є найбільш часто використовуваним, призначеним для пропускання частот нижче певної граничної частоти та послаблення частот, що перевищують його. Інші поширені типи - це високочастотні (ФВЧ), смугові (СФ) та режекторні (РФ).

Частота зрізу регулюється, а вузька смуга частот навколо цієї точки може бути посилена додатковим параметром. Величина загасання залежить від конструкції фільтра та величини полюсів у його передавальній функції і визначається в розмірності дБ/октаву (падіння на 3 дБ зменшує амплітуду вдвічі, а одна октава подвоює частоту). 6, 12 і 24 дБ на октаву є найбільш поширеними і відповідають 1, 2 або 4 полюсним конструкціям відповідно. Амплітудно-частотна характеристика практично прямокутної форм і з низьким рівнем бокових пелюстків є показником якості фільтра.

Фільтри в різних режимах можуть бути з'єднані разом, утворюючи складений каскад фільтрів. Наприклад, режими СФ і РФ можна емулювати, розташовуючи фільтри ФНЧ і ФВЧ послідовно або паралельно один одному. Інша конфігурація полягає у використанні декількох фільтрів СФ і РФ разом для реалізації формантних фільтрів, які в основному являють собою фільтри з безліччю резонансних піків по всій смузі пропускання.

### 1.2.3 Підсилювач, керований напругою (VCA)

У практичних реалізаціях сигнал, що виходить із схеми фільтра, повинен бути достатньо сильним для керування лінійними входами. Це робиться за допомогою підсилювача, і хоча це не є частиною власне процесу синтезу, це впливає на спектр виробленого сигналу через нелінійність. Зазвичай він складається з змінного параметру для встановлення загального рівня посилення, а також одного вхідного та одного вихідного порту. Найголовніше, що він також має вхід для зміни рівня амплітуди в часі, що є точкою, де сигнал генератора амплітудної обвідної ADSR впливає на сигнал з входу підсилювача. На рисунку 2 зображена схема роботи VCA для застосування обвідної.

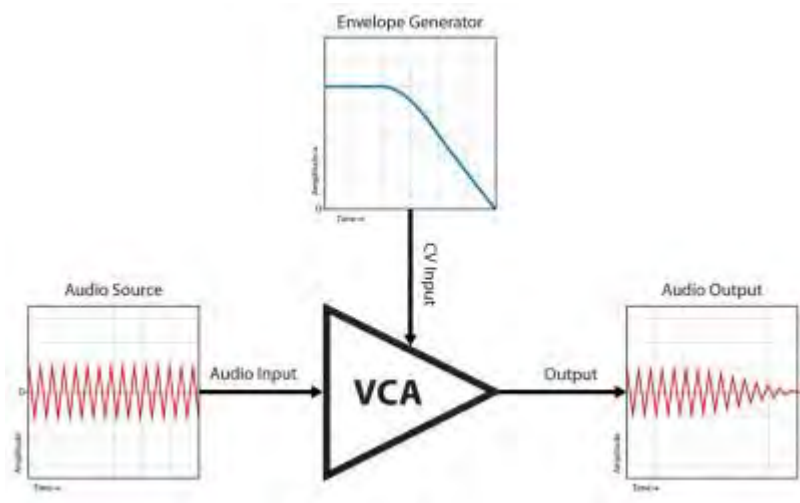


Рис. 3 Застосування VCA

### 1.3 Застосування модуляції в синтезі звуку

Нелінійні методи синтезу виробляють звук, змінюючи прості хвильові форми в більш спектрально складні, використовуючи лише кілька параметрів в процесі синтезу. Їх почали застосовувати в різних комерційних синтезаторах з початку 1980-х. Синтез за допомогою модуляції - один із таких методів, у якому деякий параметр генератора несучої постійно модифікується модулюючим генератором. Застосування модуляції в синтезі звуку було створене на основі: з однієї сторони, технік радіопередачі, а з іншої - з технік артикуляції музиканта, щоб додати незначні відтінки звучання його інструменту (вібрато або тремоло). Використання

модуляції у виробництві складних звукових форм хвиль є відносно новим відкриттям, і їх потужність стає очевидною, коли як несучі, так і модуляторні частоти сигналу потрапляють у чутний діапазон частот.

Розглянемо випадок коли синусоїдальні хвилі використовуються як для несучої, так і для модулюючої складової. На практиці може бути використаний будь-який сигнал, але оскільки навіть прості системи з лише двома синусоїдальними генераторами здатні створювати дуже складні тембри, часто цього не потрібно робити. Сигнал несучої синусоїди можна описати так [11]:

$$s(n) = A(n) \sin(n\omega_n + n\theta_c) = A(n) \sin(n2\pi f_c + n\theta) \quad (3)$$

де  $n$  - номер вибірки,  $A(n)$  - амплітуда несучої,  $\omega_c$  - кутова частота несучої,  $f_c$  - несуча частота в Гц,  $\theta_c$  - зміщення фази несучої. Можливими напрямками модуляції в цьому рівнянні є  $A$ ,  $f_c$  та  $\theta_c$ , які призводять до амплітудної, частотної та фазової модуляції відповідно. Останні два в сукупності називаються методами кутової модуляції. Зв'язок між параметрами та видами модуляції показано на рисунку 4

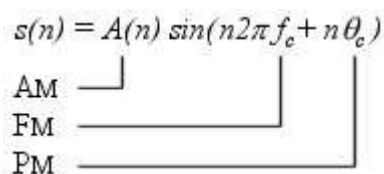


Рис. 4 Ключові параметри модуляції

AM - амплітудна модуляція, FM - частотна модуляція, PM - фазова модуляція.

### 1.3.1 Амплітудна модуляція

При амплітудній модуляції амплітуда несучого сигналу слідує за вихідним сигналом модулюючого сигналу і може бути реалізована в цифровій області

шляхом множення сигналів з виходів обох генераторів. У випадках, коли модулююча є однополярною, ми говоримо про амплітудну модуляцію (АМ), а коли біполярною - про кільцеву модуляцію (RM) [7]. У синусоїдальній АМ несуча частота оточена двома бічними гармоніками, нижчою при  $f_c - f_m$  і вищою при  $f_c + f_m$  (для складних хвиль кожна бічна гармоніка поширюється навколо основної частоти). Амплітуди обох бічних гармонік рівні і пропорційні амплітуді модулятора. У RM отриманий спектр не включає основну складову частотного спектра несучої, оскільки його енергія перетворюється в бічні гармоніки. І в АМ, і в RM бічні гармоніки повинні знаходитися в негармонійному відношенні до несучої та модуляторної частот. Тому результуючий сигнал з використанням RM має характерний металевий звук. На рисунку 5а показана блок схема методу амплітудної модуляції. На рисунку 5б показана блок схема методу кільцевої модуляції.

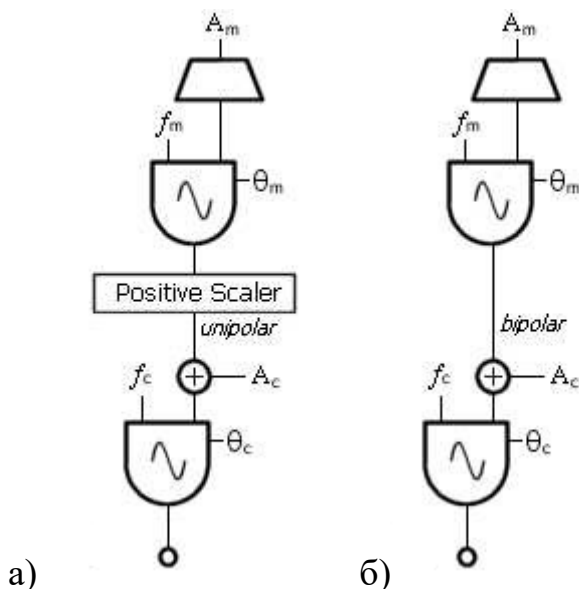


Рис 5 а) Схема амплітудної модуляції б) Схема кільцевої модуляції

Замість множення можна використовувати основні логічні функції (OR, XOR, AND) між вихідними сигналами, але оскільки операція перетворення досить

радикальна, результуючий сигнал може легко спотворюватися. Найкращі результати досягаються, коли джерела сигналів тісно пов'язані на рівнях амплітуди та частоти, але будь-яка форма сигналу джерела може використовуватися до тих пір, поки рівень його амплітуди залишається низьким.

### 1.3.2. Частотна та фазова модуляція (FM та PM)

Хоча класичний метод Чаунінга [12] та маркетингова компанія Yamaha говорять про частотну модуляцію, вони насправді використовують фазову модуляцію. Різниця між цими методами полягає в тому, що в PM фаза несучої змінюється безпосередньо в залежності від модулюючого сигналу, тоді як у FM фаза варіюється з інтегралом модулюючого сигналу [11]. У даній дисертації буде використовуватися загальна номенклатура і термін FM буде застосовано для охоплення обох методів кутової модуляції, але дослідження буде обмежено лише фазовою модуляцією.

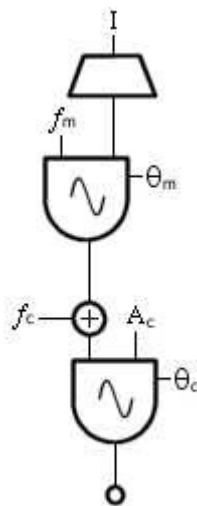


Рис. 6 Схема частотної модуляції

Рисунок 6 показує просту блок схему для синтезу сигналу методом частотної модуляції. Для простого FM синтезу з одною модулюючою синусоїдальною формою та однією несучою можемо написати рівняння:

$$s(n) = A(n) \sin\left[2\pi f_c n + I \sin(2\pi f_m n)\right] \quad (4)$$

де  $I$  - індекс модуляції, що визначає смугу пропускання результуючого сигналу. Збільшення  $I$  поширює енергію несучої на бічні смуги частот, розташовані симетрично навколо частоти на  $(f_c \pm f_m)$ ,  $(f_c \pm 2f_m)$ , з відносними рівнями амплітуди, що визначаються функціями Бесселя першого роду. Це видно з рівняння 4, яке є узагальненою формою ряду Фур'є рівняння 5:

$$s(n) = A(n) \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(I) \sin(2\pi f_c n + k2\pi f_m n) \quad (5)$$

де  $k$  - порядок функції Бесселя та номер бічної смуги частот. Негативні бічні гармоніки відображаються при 0 Гц з інверсією фази і підсумовуються до відповідної бічної гармоніки на позитивній частоті. Якщо  $f_c / f_m$  можна представити як співвідношення двох цілих чисел, створюється гармонічний спектр, але якщо це не так, виникає негармонічний спектр, оскільки відбиті компоненти потрапляють між частотами  $f_c \pm k f_m$ .

Паламін запропонував додатковий параметр  $r$  до рівняння 5, що дозволяє контролювати спектральну асиметрію навколо несучої частоти [13]:

$$s(n) = A(n) \sum_{k=-\infty}^{\infty} r^{|k|} J_k(I) \sin(2\pi f_c n + k2\pi f_m n) \quad (6)$$

Коли  $r > 1$  амплітуди бічних гармонік, що перевищують  $f_c$ , збільшуються. А якщо  $r < 1$  амплітуди бічних гармонік, що менше за  $f_c$  збільшуються. Тому

параметр  $r$  може використовуватися для фільтрації. Для рівняння синтезу (посилаючись на рисунок 5), це призводить до того, що  $I$  помножується на  $(r + 1/r) / 2$ , а  $A_c$  помножується на  $\exp(I(r - 1/r) \cos(2\pi f_m n) / 2)$ . Динамічний спектр може бути досягнутий, коли  $I$  або  $r$  модулюються у часовій області.

Існують також інші варіації простої FM-схеми, а саме подвійний FM [14], використання декількох несучих та модулюючих [7], використання складних хвиль як модулюючих [15], FM зворотного зв'язку [7] (де вихід генератора подається назад на вхід системи частотної модуляції).

#### 1.4 Синтез звуку методом **Waveshaping**

Waveshaping - загальний метод нелінійного синтезу. Класичними статтями, що описують цей метод, є [16] - [18]. При формуванні хвилі миттєва амплітуда вихідного сигналу  $g(n)$  спотворюється передаточною функцією  $F$  для отримання вихідного сигналу  $y(n)$ , який можна записати як

$$y(n) = F(g(n)) \quad (7)$$

Якщо  $F$  лінійна функція то, спотворення не виникає, і вихідний сигнал повторює вхідний (можливо, з деяким масштабуванням амплітуди щодо різних нахилів  $F$ ). Однак, якщо  $F$  - нелінійна функція, зміна вхідної амплітуди спричиняє зміну форми вихідного сигналу, що спричиняє значні спектральні зміни. Вибір  $F$  є найважливішим параметром методу Waveshaping в практичних реалізаціях, обмежених  $F(0) = 0$ , і масштабованих таким чином, щоб отримати значення в тому ж діапазоні, що і  $y$  та  $g$ . Будь-які розриви або гострі краї утворюють необмежену кількість додаткових гармонік. Обмеження смуги частот також важко досягти за допомогою складних вхідних сигналів, тому практичні реалізації часто використовують синусоїдальну функцію як  $g(n)$ . Рисунок 7 показує вибіркві результати, коли  $\sin(n)$  формується за допомогою різних передавальних функцій.



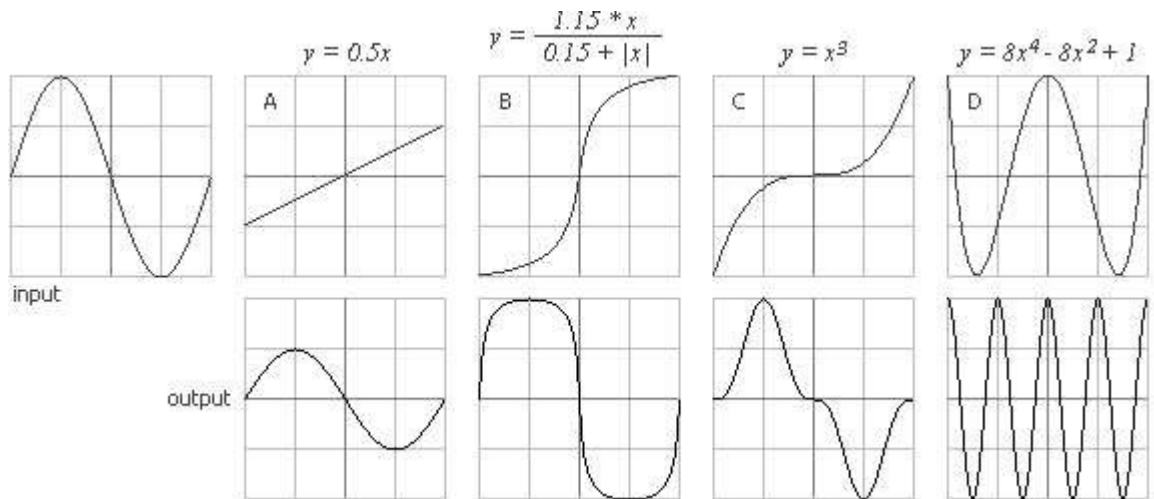


Рис. 7. Waveshaping, застосований до синусоїдального вхідного сигналу. А) Затухання. В) Компресія С) Функція непарного транслятора D) поліном Чебишева.

#### 1.4.1 Використання поліномів як передавальної функції

Поліноми мають багато корисних властивостей, коли використовуються як передавальна функція. По-перше, вони забезпечують хороше наближення будь-якої плавної кривої, тому широкий діапазон передавальних функцій може бути представлений у поліноміальній формі. По-друге, ступінь полінома визначає найвищу гармоніку, яка утворюється, коли джерело косинуса подається через формувач хвилі, обмежуючи тим самим смугу результуючого вихідного спектру. По-третє, відносні вага гармонік визначаються коефіцієнтами полінома, що дозволяє мати точний контроль над отриманим спектром, а також динамічний контроль усіх гармонік за допомогою одного параметра. Цей індекс спотворень ( $\alpha$ ) є аналогом індексу модуляції, що використовується в FM-синтезі. Вводячи  $\alpha$  у рівняння 2.6 та замінюючи  $g(n)$  на  $\cos(n)$ , ми можемо записати [19]

$$y(n) = F(\alpha \cos(n)) = d_0 + d_1 \alpha x + d_2 \alpha^2 x^2 + \dots + d_N \alpha^N x^N \quad (8)$$

де  $d_i$  - коефіцієнти поліномів,  $N$  - найвища гармоніка, що виробляється, а  $x$  - косинусна хвиля з амплітудою, що дорівнює один. Вказані коефіцієнти, амплітуди

кожної гармоніки можна розрахувати за допомогою трикутника Паскаля з двома біноміальними коефіцієнтами і зваженим за індексом спотворень  $a$ .

Властивості поліномів Чебишева першого роду роблять їх вигідним рішенням при синтезі статичного гармонічного спектра. Якщо через передавальну функцію, що складається з полінома Чебишева  $k$ -го порядку, пропускається косинусоїдальна хвиля амплітуди, що дорівнює один, та частоти  $f$ , на виході вийде синусоїдальна хвиля з частотою  $kf$  [19]. Спектр із великою кількістю гармонік може бути отриманий комбінуванням поліномів різного порядку.

Динамічні спектри можна отримати, зробивши індекс спотворення залежним від часу. Проблема полягає в тому, що передавальні функції вищого порядку не змінюють гармонійну структуру поступово, і незначні зміни індексу спотворень можуть спричинити різкі зміни пікових значень в спектрі. Можливим рішенням є чергування знаків парних та непарних значень передаточної функції [19]. Негармонічні спектри можуть бути синтезовані за допомогою кільцевої модуляції виходу хвилестворювача (waveshaper) іншим джерелом звуку.

Інша проблема виникає, оскільки індекс спотворення використовується для контролю не тільки спектрального вмісту, але й гучності звуку. Акустичні інструменти мають тенденцію звучати яскравіше, коли вони стають гучнішими за рівнем, але не часто можна знайти спільне джерело модуляції для тембру та гучності. Одним із можливих рішень є контроль вихідного рівня за допомогою окремої функції масштабування, яка також є функцією  $a$  [19].

#### **1.4.2 Синтез за допомогою кривих Безьє**

Ленг пропонує техніку синтезу, яка використовує кубічні криві Безьє в якості вихідних сигналів [20]. Крива Безьє проходить через початкову точку  $p_0$  і кінцеву точку  $p_3$  відносно двох контрольних точок  $p_1$  і  $p_2$ , так що коли  $t$  змінюється від 0,0 до 1,0, виконуються наступні рівняння [21].

$$p(t) = at^3 + bt^2 + ct + p_0 \quad (9)$$

$$\begin{cases} c = 3(p_1 - p_0) \\ b = 3(p_2 - p_1) - c \\ a = p_3 - p_0 - c - b \end{cases} \quad (10)$$

Контрольні точки додатково обмежені так, що  $p_1$  завжди повинен бути в межах  $[0,0] \dots [Z, y_{\max}]$ , а  $p_2$  у відповідній негативній координатній площині (рисунок 8).

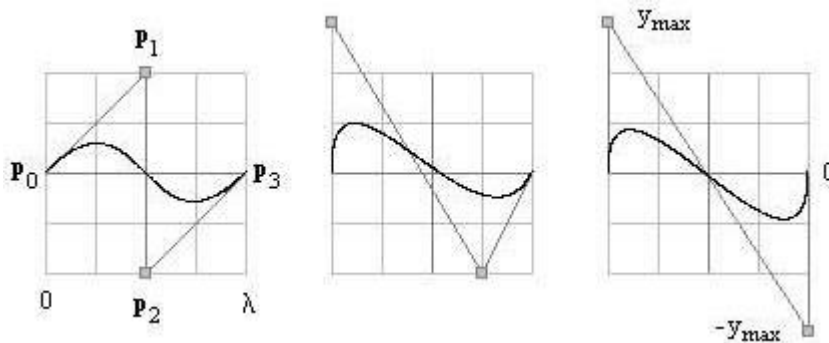


Рисунок 8. Криві Безьє

Відстань між початковою і кінцевою точками визначає довжину хвилі звуку, тоді як амплітуда визначається відносною відстанню контрольних точок до осі  $x$ . Контрольні точки можуть, модулюватися або зі швидкістю управління (коли плавно змінюється гармонійна структура сигналу або загальна амплітуда), або зі швидкістю звуку: Ленг приходиться до висновку, що коли контрольна точка модулюється за напрямком  $y$ , результати аналогічні результатам АМ, з додатковим спектральним піком на модулюючій частоті. Модулюючи в напрямку  $x$ , утворюється ФМ-подібний спектр, знову ж таки з додатковими спектральними кластерами з центром у  $2f_0$ .

## 1.5 Алгоритм Карплуса-Стронга

На початку 1980-х Кевін Карплус та Алекс Стронг розробили ефективну в обчисленні симуляцію звучання струн. На рисунку 9 представлена схема алгоритму KS, що складається з низькочастотного фільтра, генератора білого шуму, лінії затримки та модифікатора. Коли ініціюється нова нота, лінія затримки спочатку заповнюється сплеском шуму. Амплітуду сигналу на виході можна контролювати за амплітудою вставленого шуму, а тембральну дисперсію можна створювати фільтруванням низьких частот на виході генератора шуму перед тим, як він буде вставлений в лінію затримки. Вироблена висота звуку визначається довжиною лінії затримки в поєднанні із введеною модифікатором груповою затримкою.

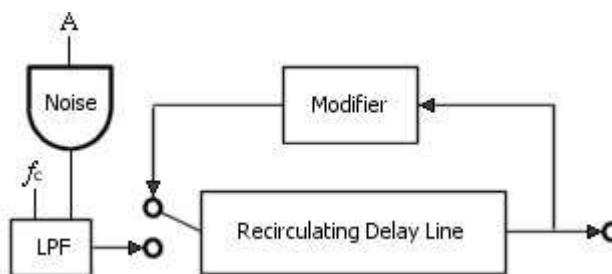


Рис. 9

Фактична стадія створення звуку відбувається через відліки в лінії затримки. Виводячи і подаючи кожен відлік через модифікатор назад у лінію затримки для наступного циклу формування сигналу. Якщо нехтувати модифікатором, створюється шумовий тембр, що має спектр з усіма гармоніками і однаковими за рівнем амплітудами. Для того, щоб отримати на виході затухаючу амплітуду, модифікатор може бути побудований з фільтром, що має коефіцієнт посилення менше одиниці, таким як простий усереднюючий фільтр низьких частот першого порядку:

$$y(n) = [x(n) + x(n-1)] / 2 \quad (11)$$

Таким чином генерується сигнал, обвідна якого швидко зводиться до синусоїдальної форми коливань. Загальний час затухання обернено пропорційний

виробленій висоті, тобто нижчі тони мають більший час затухання, ніж вищі, що також має місце у справжніх акустичних інструментах. Можна змінити загальний час затухання, помноживши праву частину рівняння на коефіцієнт затухання трохи менше 1. Щоб розтягнути час затухання, модифікатор можна записати у формі [7]

$$y(n) = \frac{[x(n) + x(n-1)]}{2} \text{ з імовірністю } 1/s$$

$$y(n) = x(n) \text{ з імовірністю } 1 - 1/s \quad (12)$$

де  $s$  - коефіцієнт псевдовипадкового розтягування в діапазоні від 0 до 1. Можливі й інші конструкції модифікатора які, наприклад, можуть бути виготовлені за допомогою коефіцієнта імовірнісного змішування [22].

Базовий алгоритм має такий недолік як проблема з налаштуванням, які спостерігаються при більших висотах тону (коли довжина лінії затримки зменшується). Насправді, деякі висоти у верхній частині діапазону клавіатури не відповідають більш ніж одному півтону. Яффе та Сміт запропонували використовувати інтерполуючі фільтри для отримання дробної довжини лінії затримки [23] та ввели інші важливі розширення до базової реалізації. Вони також додатково вивчили алгоритм і зрозуміли, що він аналогічний фізичній вибірці поперечної хвилі на струнному інструменті, де фільтр зворотного зв'язку представляє загальні втрати струни за один період. Узагальнення алгоритму призвело до методів цифрового синтезу хвилеводів. Наприклад Салліван застосував алгоритм до моделювання електричної гітари з ефектом дисторшн та зворотним зв'язком [24].

## 1.6 Таблично-хвильовий синтез (Wavetable)

Методи таблично-хвильового синтезу засновані на цифровому осциляторі, який генерує вихідний сигнал, просто зчитуючи окремі вибірки з вбудованої в пам'ять

хвильової таблиці, що містить заздалегідь розраховані або попередньо записані форми сигналів. Обґрунтування цього підходу полягає в тому, що доступ до пам'яті вимагає набагато менше обчислювальних ресурсів. Хоча схема обробки кеш-пам'яті мікропроцесора може призвести до ситуації, коли кількість часу обробки великої таблиці між основною пам'яттю та кеш пам'яттю стає недоліком, і прості обчислення насправді можуть виконуватися швидше, ніж доступ до таблиці. Таблично хвильовий синтез є дуже універсальним, оскільки може створюватися будь-який звук, але недоліком є те, що він досить негнучкий з точки зору модифікацій у реальному часі [25]. Це також вимагає багато пам'яті в порівнянні з іншими методами синтезу, які можна зменшити за допомогою циклів, зсуву висоти та алгоритмів стиснення даних. Однак цей метод є популярним завдяки використанню в комп'ютерних звукових картах, мобільних телефонах та спеціальних блоках дискретизації. Частоту цифрового осцилятора що використовують хвильові таблиці можна розрахувати за формулою:

$$f_0 = f_s \frac{SI}{N} \Leftrightarrow SI = N \frac{f_0}{f_s} \quad (13)$$

де  $SI$  - прирост вибірки,  $f_s$  - частота дискретизації, а  $N$  - розмір хвильової таблиці. Щоб отримати різні частоти з одного і того ж вихідного матеріалу,  $SI$  слід змінити, оскільки в системах із фіксованою частотою дискретизації  $f_s$  є константою, і те саме стосується  $N$ , а значить вміст хвильової таблиці зазвичай не змінюється. Зміна  $SI$  ефективно змінює розмір хвильової таблиці, пропускаючи або утримуючи відліки під час сканування таблиці.

$SI$  зазвичай має дробову частину, яку потрібно перетворити на цілочисельний індекс. Є кілька рішень, найпростіший - це метод усічення, який жорстко ігнорує дробову частину. Округлення осциляторів округлює значення з плаваючою комою до найближчого цілого числа, що є більш точним. Але більш якісних результатів

можна досягти за допомогою інтерполюючих осциляторів (можуть використовуватися лінійні або навіть вищого порядку). Всі ці методи округлення додають шум до вихідного сигналу, і існує традиційний компроміс між обчислювальною вартістю та зменшенням помилок.

Таблиця 1.1 Відношення сигнал шум у цифрових осциляторах відносно розміру хвильової таблиці  $k$  (у бітах) [19].

метод	SNR в дБ	256 bytes	512 bytes	1024 bytes
усічення	$6(k-2)$	36	42	48
округлення	$6(k-1)$	42	48	54
лінійна інтерполяція	$12(k-1)$	84	96	108

Таблично-хвильовий синтез об'єднує ряд методів, які можна класифікувати на основі кількості хвильових таблиць, які чути одночасно [7]. Кілька хвильових таблиць, як правило, використовуються у багатьох варіаціях, оскільки навіть незначна зміна висоти тону швидко змінює характер оригінального звучання. Тому потрібно активувати різні форми хвиль у відповідь на інтенсивність артикуляції.

У найпростішій формі чути лише одна хвильова таблиця, та, яка вибирається з доступного набору хвиль і базується на висоті та інтенсивності спрацювання клавіші. Ця форма використовується у простих комп'ютерних звукових картах та мобільних телефонах, особливо тих, що підтримують формат файлів Etc SoundFont або одним з різновидів стандарту MPEG-4, відомого як SASBF.

Змішаний синтез хвильових сигналів (wavetable crossfading) є більш досконалим варіантом. При його використанні дві хвилі змішуються між собою, так що, поки перша згасає, наступна наростає. Це може зробити перехід від однієї тональності до іншої більш плавним, ніж у варіації з однією хвилею. Також можливим методом перехресного затухання є використання інтерполюючого

генератора, щоб початкова форма хвилі поступово перетворювалася на другу хвилю.

Іншим змішаним методом синтезу хвильових таблиць, досить схожим на перехресне затухання, є хвильове укладання, яке насправді є формою адитивного синтезу. Він використовує складні хвилі як компоненти замість простих синусоїд. Будь-яку кількість хвильових таблиць може бути чуто одночасно, і кожен генератор має свою власну амплітудну огинаючу. Ці методи були впроваджені в більш просунутих семплерах і були досить успішно використані в синтезаторах, що розділяли вибірккову атаку - частину обвідної ADSR. Синтезатори що використовують векторний синтез також належать до цієї категорії.

### **1.7 Застосування ефектів у синтезі звуку**

Чистий синтетичний звук часто звучить досить сухо. Його можна охарактеризувати як електронний, холодний, нудний і неприродний у порівнянні зі звуком, що генерується традиційними акустичними інструментами. З іншого боку, не обов'язково фізична побудова акустичних інструментів робить їх звучання цікавішим для прослуховування та гри. Це також багато в чому пов'язано з навколишнім середовищем, в якому грає інструмент. Акустичні інструменти випромінюють звукову енергію у тривимірний простір, і цей простір додає свої характеристики до результуючого звуку, тоді як електронний звук виводиться через системи гучномовців які мають направленість.

З цієї причини з самого початку синтезований звук оброблявся пристроями ефектів, щоб зробити його більш природним і цікавішим для прослуховування. Спочатку ці пристрої були окремими апаратними елементами і використовувались для подальшої обробки звуку, виробленого синтезатором, для імітації групи інструментів, що грають разом, або для імітації акустичного простору за допомогою ехо-сигналів або ревербераторів. Наступним кроком було інтегрування зовнішніх ефектів у сам блок синтезатора, і коли синтезатори переходили в цифрову область, аналогові ефекти замінялись цифровими. Переважав підхід



пост обробки, оскільки ефекти зазвичай розміщувались в кінці ланцюжка обробки звуку. Що ще важливіше, ефекти сьогодні можна розглядати як невід'ємну частину продукуваного звуку, оскільки параметри алгоритму ефекту зберігаються разом із прошивкою, а деякі параметри можуть навіть модулюватися, як звичайні параметри синтезу. Це робить їх справжніми модифікаторами звуку, виконуючи ту саму роль, яку зазвичай виконують фільтри. Новітні архітектури синтезаторів також дозволяють окремо регулювати кількість обробки ефектів для кожного компонента складеного звуку у вигляді шин передачі / повернення (де загальний ефект ділиться між усіма компонентами, але з різними кількостями), або як ефекти вставки (де компоненту призначається виділений ефект із контрольованою кількістю впливу цього ефекту на звук).

У наступних розділах коротко описуються типи ефектів, які найчастіше зустрічаються в синтезаторі, із переліком їх найважливіших параметрів. Звичайно, що алгоритми ефектів можна вибрати з великого набору, але одночасно можуть бути активними лише деякі з них.

### **1.7.1 Ефекти що використовують зміни в часовій області**

Ефект затримки (Delay) повторює вихідний сигнал один або кілька разів, імітуючи відлуння, що відбивається від віддаленої поверхні. У найпростішій формі для управління алгоритмом використовуються лише два параметри: час затримки (тобто проміжок часу між повтореннями) і зворотний зв'язок для визначення кількості повторень. Доступні також більш складні ефекти затримки, включаючи стереофонічні одиниці із зворотним зв'язком панорамування, багатоступінчасті моделі (де вся довжина лінії затримки ділиться на кількість коротших сегментів), параметри, прив'язані до зовнішнього темпу сигналу, та параметри, які імітують реалізації аналогових стрічкових пристроїв або реалізацій сегментів з фільтром низьких частот у ланцюзі зворотного зв'язку або з невеликою випадковістю, введеною до часу затримки.

Реверберація використовується для імітації простору природного середовища шляхом введення попередньої затримки, ранніх відбиттів (сприйняття розміру кімнати) та затухаючих пізніх відбиттів у вихідний сигнал. Параметри можуть бути використані для вказівки типу реверберації (пластини, пружини, стрічки, приміщення), розміру приміщення або часу затухання та змодельованої текстури середовища (високочастотне демпфування, дифузія). Зазвичай цей ефект використовують в кінці аудіо тракту синтезатора. Також його використовують і як ефект передачі при роботі з мікшерними консолями.

### **1.7.2 Ефекти що використовують модуляцію**

Коли довжина лінії затримки модулюється періодичним низькочастотним сигналом, висота тону сигналу з затримкою постійно змінюється від вхідного сигналу. Якщо час затримки залишається невеликим, можна імітувати ефект від декількох інструментів, що грають в унісон. А звук, що виробляється, можна охарактеризувати як тепліший, ніж вхідний звук.

Таким чином створюється ефект хору. Він часто зустрічається в синтезаторах з одним осцилятором для того щоб зробити звучання більш насиченим. Параметри включають баланс суміші dry/wet сигналу, час затримки, глибину модуляції (тобто, на скільки змінюється час затримки), швидкість модуляції (наскільки швидко коливається час затримки між мінімальними та максимальними значеннями) та ширину, що визначає стереофонічний розподіл ефекту. Удосконалені пристрої мають кілька паралельних ліній, або обрані сигнали LFO.

Ефект фленджер схожий на хор, але використовує коротший час затримки та додатковий параметр для зворотного зв'язку.

Ефект вібрато можна створити, встановивши параметр суміші на 100 % wet.

Ефекти амплітудної модуляції включають Tremolo (досягається шляхом модуляції амплітуди вихідного сигналу за допомогою LFO, встановленого на імпульсний або трикутний сигнал) та кільцевої модуляції, де миттєва амплітуда джерела сигналу помножується на інший біполярний сигнал частоти звуку.

Ефект phaser може бути створений шляхом змішування вихідного сигналу з сигналом з затримкою, що пропущений через серію фільтрів allpass. Кожна ступінь allpass (їх зазвичай 4-12) вносить фазовий зсув у сигнал, і весь рядок фільтрів може бути налаштований на отримання спектра з нерівномірним розподілом. Потім генерується характерний динамічний звук фазера шляхом зміщення позицій виїмки вгору і вниз у частотній області за допомогою LFO.

## 1.8 Фільтри

Основні синтезаторні фільтри (ФНЧ, ФВЧ, РФ, СФ) вже обговорювались у розділі 1.2.2. Графічний еквайзер - це спеціальний тип фільтра, у якому весь звуковий діапазон частот розділений на групу рівномірно розташованих смугових фільтрів. Кожна смуга частот має параметр, який або підвищує, або зменшує амплітуду сигналу на частотах навколо центру смуги. Параметричний еквайзер дозволяє визначити центральну частоту, до якої застосовується збільшення, або зменшення амплітуди сигналу. Зазвичай він також має налаштування пропускну здатності навколо центральної частоти, на яку впливає операція фільтрації. Еквайзери зазвичай розташовані в кінці ланцюжка сигналів.

## 1.9 Підсилення та компресія

Компресор стискає динамічний діапазон, послаблюючи частотні складові високого рівня гучності звуку та підвищуючи складі з низьким рівнем гучності. Параметри складаються з порогового значення (це рівень, який повинен досягти вхідний звук до того, як стиснення стане активним), співвідношення між вхідним та вихідним сигналом, що визначає величину стиснення. Також час атаки та випуску. Еспандер має зворотний ефект.

Лімітер впливає лише на сигнали високого рівня гучності, послаблюючи ті, які можуть обійти встановлений поріг. Це більш жорстка форма стиснення, яка спочатку використовувалася для максимізації гучності без перевантаження динамічного діапазону. Спочатку шумові затвори використовувались для

зменшення фонового шуму, встановлюючи порогове значення, яке повинен досягати сигнал, перш ніж він передається на вихід.

Коли динамічний діапазон перевантажений, нові високочастотні компоненти вводяться у вихідний сигнал. Overdrive спочатку було досягнуто за рахунок перевантаження клапанів лампових підсилювачів. Цей ефект широко використовується при обробці звуків електрогітари.

Дисторшн або fuzz - це більш жорсткий звуковий ефект, він виникав, коли транзистори були перевантажені. Параметри включають величину перенавантаження або коефіцієнта посилення (тобто, кількість вихідного сигналу що посилюється за контрольний рівень).

## **1.10 Stereo та панорамування**

Автоматичне панорамування має LFO або EG, приєднаний для циклічної модуляції стереофонічного позиціонування джерела сигналу. Існують також психоакустичні методи панорамування, які імітують бінауральні відмінності та сигнали відстані, щоб створити 3D-звукові картини через бінауральні канали або створити псевдостерео сигнали з монофонічного джерела.

## **1.11 Застосування обвідної**

Без генераторів модуляції навіть найскладніший алгоритм синтезу буде звучати статично. Обвідна здатна зробити звучання динамічним. Вона представляє собою групу керуючих сигналів, що несуть сигнали модуляції, які попередньо запрограмовані на патч і застосовуються автоматично або у відповідь на зовнішню подію виконавця.

### **1.11.1 Генератори обвідної ADSR**

Амплітуда природних звуків з часом не є постійною, а скоріше йде за контуром обвідної, характеризуючи конкретне джерело звуку. Цей контур можна розділити на етапи, і кожен етап може бути апроксимований прямою лінією або

експоненційною кривою, проведеною між початковою та кінцевою точками сегмента. Пристрій, який виробляє поштучно лінійні або експоненційні функції часу, називається генератором обвідної. Традиційні генератори обвідної мають засоби контролю часу атаки, спадання та випуску, а також рівень затримки (див. Рисунок 9). Генератор обвідної спрацьовує натисканням клавіші: він починається з нуля і переходить до максимальної амплітуди в часі, встановленої параметром часу атаки, а потім згасає, щоб підтримувати рівень в межах атрибута часу затухання, де він залишається до відпускання клавіші. Нарешті, амплітуда переходить від рівня затримки до нуля протягом встановлення параметрів часу випуску. Пізніші конструкції містять складні багатоступеневі генератори обвідної із петельними секціями.

Вихід генератору обвідної зазвичай підключається до модуля VCA для того, щоб змінити рівень гучності, таке підключення було розглянуто у розділі 1.2.3, рисунок 3. Також він може використовуватися для модуляції частоти зрізу фільтра та кроку генератора. Слід зазначити, що коли EG вкладається в підсилювальний модуль, він повинен бути однополярним, тоді як в інших випадках такого обмеження немає.

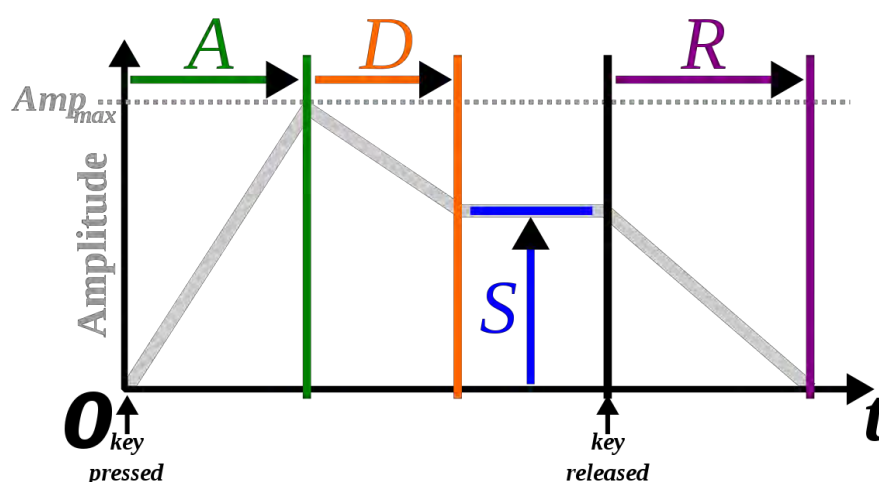


Рисунок 9 Обвідна ADSR

Attack (Атака) — визначає час, потрібний для того, щоб гучність ноти досягла свого максимального рівня.

Decay (Спадання) — визначає час, протягом якого відбувається перехід від максимального рівня до рівня Затримки (Sustain).

Sustain (Затримка) — описує рівень звуку, що грає під час утримання клавіші (після того як інші складові: Атака й Спадання уже відіграли).

Release (Згасання) — визначає час, потрібний для остаточного згасання звучання ноти до нуля, після того як клавіша відпущена.

ADSR обвідна створюється шляхом множення (модулювання) вхідного сигналу з коефіцієнтом масштабу  $a(t)$ , обумовленого формою ADSR

$$y(t) = a(t) \cdot x(t) \quad (14)$$

Для того щоб розглянути детально  $a(t)$  перейдемо в векторну форму запису  $a(n)$ , притаманну дискретним сигналам [26]

$$a(n) = a^{\sim} + (1 - g) \cdot a(n - 1) \quad (15)$$

$a^{\sim}$  - цільове значення (target value)

$g$  - значення підсилення

Для ділянок сигналу Attack Decay Sustain Release підбираються відповідні значення  $a^{\sim}$  і  $g$  для отримання бажаної форми обвідної.

### 1.11.2 Оцилятор низьких частот (LFO)

Поширеною технікою використання LFO є введення легкого вібрато на підтримуючу сцену звуку. Такі зміни в частоті можуть бути змодельовані низькочастотним генератором, що працює на частотах до 20 Гц, підключених до OSC, VCA або VCF. Цей метод дозволяє створювати різноманітні ефекти,

починаючи від тонкої вібраторподібної модуляції і закінчуючи широкими діапазонами частотних переходів.

Параметри синтезу LFO складаються з вибору форми хвилі (де доступні всі знайомі форми OSC, включаючи як пилкоподібні, так і випадкову форму хвилі), частоти в діапазоні 0,01 ... 30 Гц, амплітуди, що визначає глибину модуляції, та затримки для застосування вібратору на підтримуючу фазу ноти.

### 1.11.3 Нестандартні методи обвідної

На відміну від безперервного потоку випадкових значень, що генерується випадковою формою сигналу LFO, Генератор випадкових значень (RVG) створює нове значення тільки у відповідь на задану користувачем подію.

Ще одним методом є компонент Sample and Hold, який відбирає поточне значення у своєму входному порту при кожному запуску і продовжує виводити це значення до повторного запуску.

Генератор рампи схожий на генератор обвідної з однією стадією атаки: при спрацьовуванні його значення стає нульовим і повертається до певного заданого значення при параметризованій швидкості нарощування. Він часто використовується для вицвітання та розгортки, і хоча його можна замінити звичайними генератором огиначої, його використання набагато простіше, оскільки для контролю існує лише один параметр.

Генератор відстеження схожий на waveshaper для управління формою сигналу у часі. Він перетворює лінійне входне значення у вихідне через параметризовану дискретну криву. Таким чином, він може змінювати форму або масштаб джерела модуляції і часто використовується при створенні нестандартних огинаючих.

Процесор запізнення згладжує раптові зміни в сигналах управління, дозволяючи роздільне управління часу атаки та падіння сигналу. Наприклад, коли він під'єднаний до висоти тону осцилятора і викликаний подією, досягається ефект портаменто. Однак немає обмежень щодо параметра призначення, тому він також може контролювати швидкість та форми LFO.

## 1.12 Пристрої керування синтезатором

Друга група керуючих сигналів передає події, пов'язані з пристроями виконання (наприклад, інструкції відтворювати ноту на певному висоті в конкретний момент часу, із збільшеною кількістю вібрато) від фізичних контролерів (наприклад, клавіатури або колеса модуляції) на логічні входи управління синтезатора. Крім того, керуючі сигнали можуть генеруватися іншим синтезатором. В аналоговому домені це може бути арпеджиатор, кроковий секвенсор або будь-який інший генератор керуючої напруги. За допомогою синтезатора, керованого цифровим способом, дані можуть надходити з комп'ютерної програми, яка реєструє виступи музиканта, де міститься відредагована музична партитура в електронному форматі, або навіть від алгоритмічного віртуального композитора чи концертмейстера.

При такому різноманітті джерел важливо мати універсальну специфікацію інтерфейсу, щоб визначити, як ці пристрої можуть бути зрозумілі один одному. Аналогова шина управління працює з рівнями керуючої напруги, і в цифровій області одним із ранніх і досі найбільш широко використовуваних форматів потоків подій є MIDI, який визначає як електронний інтерфейс, так і протокол обміну повідомленнями між музичними інструментами [26].

З цією метою він визначає набір джерел управління та їх очікувані пункти призначення всередині 16-канального потоку, що працює зі швидкістю 31,25 кбіт / с. Це послідовний протокол, де байт складається з 10 бітів (8 для даних плюс 2 для синхронізації), тому час передачі для одного байта становить 0,320 мс. Пакети подій мають довжину від одного до трьох байтів (1 байт, якщо використовується запущений статус), тому передача одинарної події займає 0,320, 0,640 або 0,960 мс, типовий випадок - трибайтова версія. З кожною подією контролера пов'язане значення даних 7 або 14 біт, але, на жаль, вони є загальнодоступними для всього каналу, і єдиними конкретними подіями. Що стосується нотаток, є включення-



вимикання, швидкість та поліфонія. Структура повідомлень каналу MIDI зображена на рисунку 10.

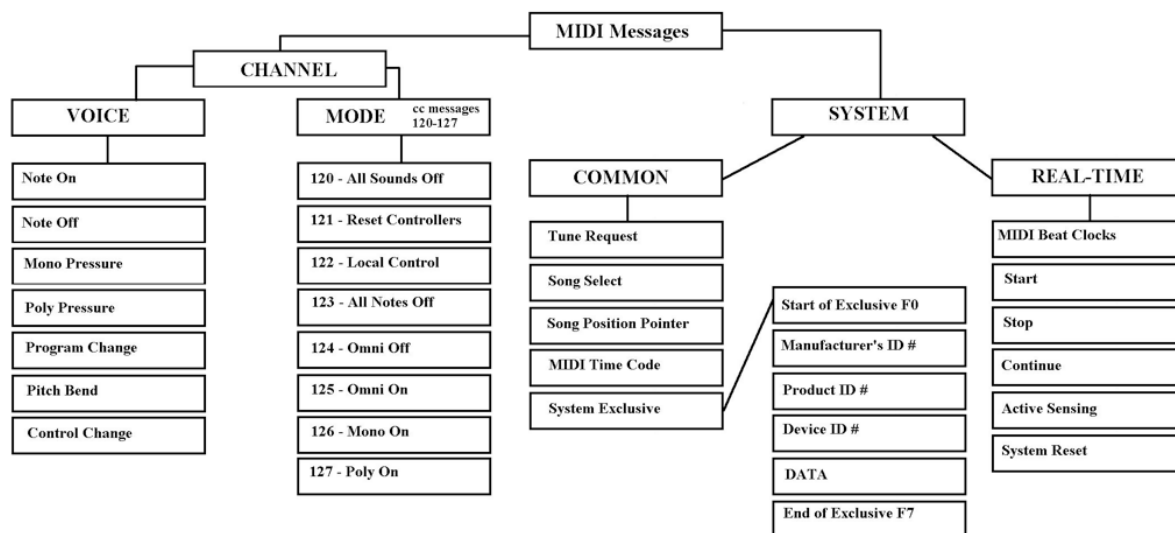


Рис. 10 Структура міді повідомлень

### 1.13 Матриця модуляції

Модульні синтезатори використовують дуже гнучкі можливості маршрутизації сигналу, оскільки майже будь-який джерело сигналу може бути підключений до будь-якого можливого місця призначення для цілей модуляції. Напівмодульні синтезатори часто направляють свої сигнали модуляції через матрицю модуляції, яка має рядок (або слот) для кожної пари з'єднань джерело-адресат, для кожного доступного пункту призначення, та регулятор (або значення параметра) на кожному перехресті, щоб визначити величину модуляції. Зазвичай одне джерело може модулювати будь-яку кількість пунктів призначення, і кожне місце призначення може мати кілька джерел.

Стандарт «Завантажувані звуки» розширює базову концепцію трохи далі [27]. Блоки з'єднання використовуються для визначення зв'язків між джерелами та пунктами призначення, і вони складаються з джерела модуляції, управління, масштабування, перетворення та призначення. Джерелами є або внутрішні

генератори (LFO та EG), або зовнішні джерела MIDI (наприклад, номер ключа, швидкість або коло кроку). Елемент керування може використовуватися для компенсації величини модуляції (наприклад, колесо може впливати на величину зміни висоти тону, генеровану джерелом LFO). Значення масштабу визначає попередньо встановлене значення пункту призначення або величину модуляції, а перетворення використовується для застосування конкретного відображення в просторі параметрів призначення.

### **1.14 Змішане використання методів синтезу**

Цей розділ намагається знайти спільні компоненти різних методів синтезу, представлених у попередніх підрозділах, з метою побудови гібридного середовища, де різні методи можуть співіснувати одночасно. Таке середовище було б здатне виробляти звуки з найрізноманітнішими тембрами, оскільки можуть бути враховані сильні та слабкі сторони окремих методів.

Очевидно, що осцилятор використовується усіма методами. Техніка таблично-хвильового методу дозволяє використовувати будь-яку форму сигналу як джерело, форму можна навіть генерувати алгоритмічно з заздалегідь визначеними спектральними властивостями. *Waveshaping* використовує передаточну функцію, щоб змінювати отримане значення із сигналу осцилятора.

Методи модуляції вимагають взаємозв'язків генераторів, як і субтрактивна жорстка синхронізація та адитивне змішування. Досить поширеним рішенням є розміщення генераторів у матриці модуляції разом із шляхами зворотного зв'язку. Тоді типи взаємозв'язку включатимуть АМ з варіаціями, FM та PM, синхронізацію та просту арифметичну суміш, з величиною модуляції, встановленою модулюючим рівнем осцилятора. В цьому випадку кожен осцилятор також визначає входи для модуляції амплітуди та частоти.

Фільтрування використовується виключно методом субтрактивного синтезу, оскільки іншим методам вдається внутрішньо формувати спектри. Виняток - алгоритм Карплуса-Стронга, який використовує фільтри в циклах збудження та

зворотного зв'язку. Однак, оскільки вихідний сигнал, вироблений будь-якою з наведених вище методик, може бути спектрально багатим, фільтрування може бути належним і в цьому контексті.

Також кінцеве звучання коригується ефектами що широко використовуються у синтезаторах.

## 2. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ СИНТЕЗУ НА МІКРОКОНТРОЛЕРІ AXOLOTI CORE

### 2.1 Характеристики мікроконтролера

Axoloti Core це програмуємий мікроконтролер розміщений на друкованій платі зі стерео входом і виходом, аналого-цифровими та цифро-аналоговими перетворювачами. Використовується для реалізації алгоритмів синтезу та обробки цифрових аудіосигналів з можливістю створювати автономне обладнання. Всі роз'єми розташовані на одній стороні, що дозволяє легко створити власний настільний пристрій, модуль або щось інший вид пристрою. Мікроконтролер підключається до ПК і програмується у середовищі Axoloti Patcher. Axoloti Patcher являється відкритим програмним забезпеченням, тобто має відкритий початковий код. Тому бібліотека об'єктів що використовується в прошивках досить велика, та постійно оновлюється. Вигляд мікроконтролера Axoloti Core показано на рисунку 11.

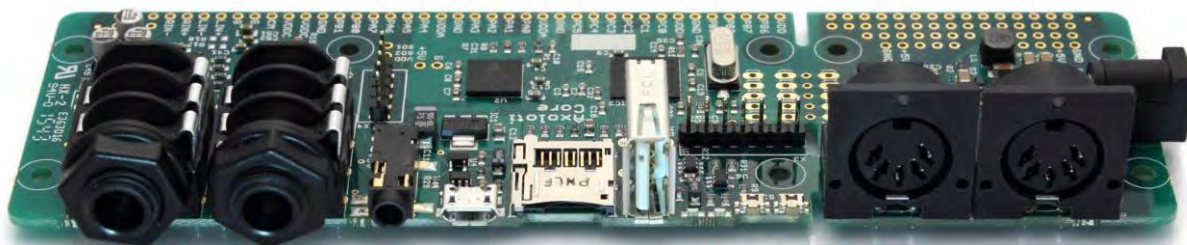


Рис.11 Axoloti Core

Компоненти та характеристики [28]:

- Зібрана друкована плата
- Мікроконтролер STM32F427 168 МГц
- 24-біт / 96 кГц стерео аудіо АЦП / ЦАП
- 8 Мб SDRam
- Бортовий імпульсний блок живлення
- Розміри друкованої плати: 160 x 50 мм

- 3 мм отвори для кріплення

Роз'єми:

- TRRS стерео вхідний роз'єм (лінійний рівень з цифровим керуванням аналоговим коефіцієнтом посилення до 55 дБ)
- TRRS вихідний стерео роз'єм (цифровий регульований рівень гучності, з постійним струмом)
- 3,5 мм TRRS - роз'єм для навушників (той самий звук, що і стерео вихід, незалежна гучність)
- MIDI-вхід (5-полюсний DIN)
- Вихід MIDI (5-полюсний DIN)
- Слот для Micro-SDCard
- Порт пристрою Micro-USB
- Повнорозмірний хост-порт USB, підтримує сумісні з USB-MIDI пристрої.
- Вхід постійного струму (7-15 В, центральний штифт 2,1 мм, позитивний центральний штифт)
- Паяльні майданчики для підключення потенціометрів, фейдерів, перемикачів, світлодіодів... (16 сигналів, земля, живлення 3,3 В, 5 В). Усі входи / виходи - це сигнали 3,3 В.

## **2.2 Створення найпростішого синтезатора у середовищі Axoloti Patcher**

Створення прошивки найпростішого синтезатора відбувається наступним чином. Треба двічі клацнути у будь-якому місці порожнього документа, щоб відкрити вікно вибору об'єкта. Потім ввести `osc` та вибрати об'єкт `osc / sine`. Натиснути клавішу `Enter`, щоб додати об'єкт до документа. Дії описані вище можна побачити на рисунку 12

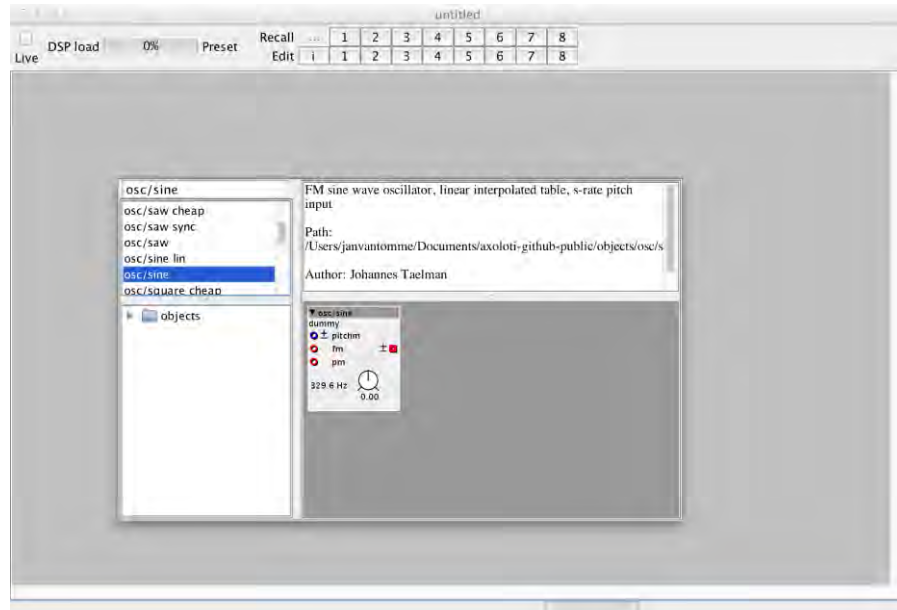


Рис.12 Початок роботи у середовищі Axoloti Patcher

Для створення найпростішого синтезатора потрібні ще 4 наступні елементи

1. `midi/in/ keyb mod`: Цей об'єкт представляє собою MIDI-інтерфейс та обробляє всі вхідні нотатки.
2. `osc/sin`: основний генератор синусоїди. Це об'єкт, який буде генерувати синусоїдальну хвилю.
3. `math / * c`: Цей об'єкт множить сигнал, що проходить через нього, на постійне значення. Використовується для регулювання гучності синтезатора. Об'єкт має червоний вхід і вихід, оскільки цей він буде використовуватися для аудіосигналу.
4. `audio/output stereo`: цей об'єкт надсилатиме звуковий сигнал на аудіовиходи на платі Axoloti.

Додавши об'єкти, прошивка має виглядати так, як на рис 13



Рис.13 Розташування об'єктів у прошивці для найпростішого синтезатора

Наступним кроком є підключення об'єктів за допомогою “патч-кабелів”. Вхідні отвори виводяться зліва від об'єкта, вихідні отвори - з правого боку. Вхідні та вихідні отвори мають різні кольори. У об'єктах є сині, червоні та жовті вхідні та вихідні отвори. Найкращою практикою є підключення вхідних і вихідних отворів одного кольору, але є деякі винятки.

Підключення відбувається наступним чином:

1. Вихід note об'єкта midi/in/ keyb mod має бути підключений до входу висоти осцилятора.
2. Вихід осцилятора має бути підключений до входу об'єкта math / \* c.
3. Вихід об'єкта math / \* c має бути підключений до обох входів об'єкта аудіовиходу.

Прошивка відбувається наступним чином:

1. Плата Axoloti має бути підключена до комп'ютера за допомогою кабелю Micro USB.
2. Випромінювач має бути підключений на основний аудіовихід.
3. Прапорець Live у верхньому лівому куті інтерфейсу має бути вибраний, щоб скомпілювати та завантажити патч на мікроконтролер.

4. Можна використовувати віртуальну клавіатуру або підключити фізичну MIDI-клавіатуру до відповідного роз'єму.
5. При обертанні регулятора  $\text{math}/ * c$ , збільшується гучність.
6. При натисканні клавіш на віртуальній клавіатурі і створюється звук найпростішого синтезатора.

Об'єднання всіх об'єктів в єдиний тракт зображено на рисунку 14.

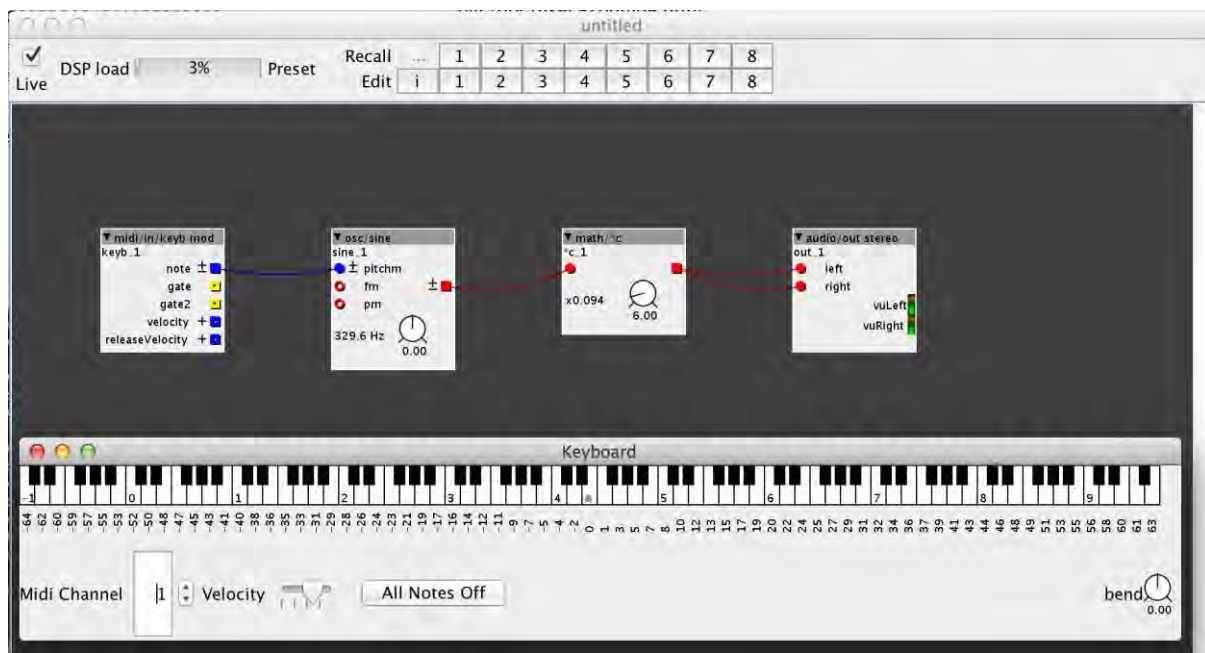


Рис.14 Тракт для найпростішого синтезатора

Розглянута вище реалізація проста але має суттєвий недолік. Після відпускання ноти на клавіатурі звук продовжує відтворюватися. Будь-який музичний синтезатор повинен видавати звук під час натискання клавіші та зупинятися, коли клавішу відпускають. Зробити відповідний функціонал синтезатора можливо за допомогою об'єкта `vsr`. Для цього модифікувати файл прошивки (патч) наступним чином:

1. Провід між генератором та об'єктом  $\text{math}/ * c$  має бути від'єднано.



2. Новий об'єкт `gain/vca`, який ви щойно потрібно розмістити між генератором та об'єктом `math/*c`.
3. Підключити вихід осцилятора до червоного входу об'єкта посилення / `vca`.
4. Підключити вихід вихідного об'єкта `gain/vca` до входу об'єкта `math/*c`.
5. Підключити жовтий вихід `gate` об'єкта клавіатури MIDI до синього входу об'єкта `gain / vca`. Це один із можливих зв'язків між різними кольорами.

Об'єднання всіх об'єктів в єдиний тракт зображено на рисунку 15.

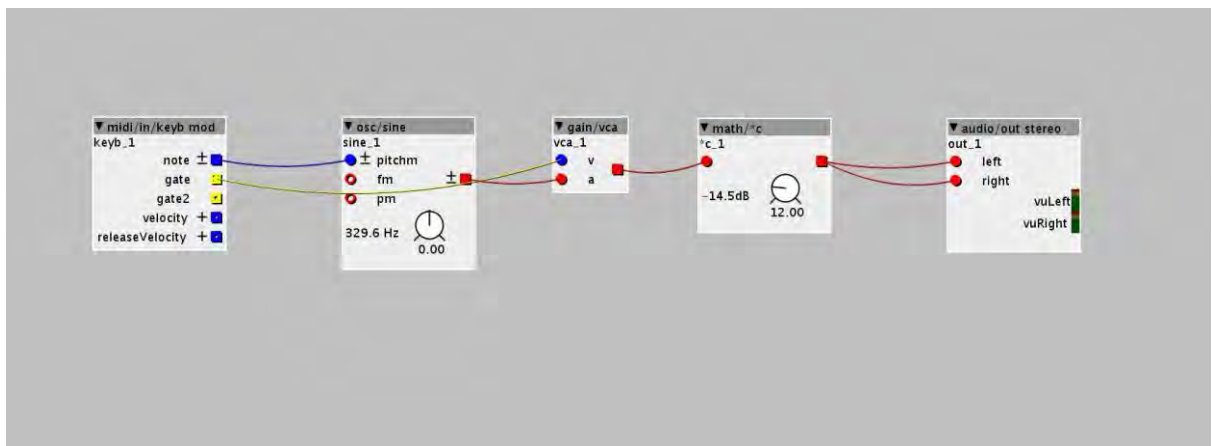


Рис.15 Модифікація патчу з використанням об'єкта `vca`

Об'єкт `vca` являє собою емуляцію підсилювача керованого напругою, розглянутого у розділі 1.2.3. Хоча поточний патч працює так, як працює більшість синтезаторів, але є ще один недолік який потрібно вирішити. Усі ноти відтворюються з однаковою гучністю. Тож потрібно додати функціональність для того щоб гучність залежала від сили натискання на клавіші.

Для цього потрібно додати ще один об'єкт `gain/vca`. Від'єднати провід між першим об'єктом `gain/vca` та об'єктом `math/*c`. Потім підключити вихід першого об'єкта `gain/vca` до червоного входу другого об'єкта `gain/ vca`.

Наступним кроком буде підключення виходу другого об'єкта `gain/vca` до входу об'єкта `math/*c` та підключення виходу `velocity` об'єкта клавіатури MIDI до синього

входу другого об'єкта gain/vca. Застосування даної модифікації до патчу зображено на рисунку 16.

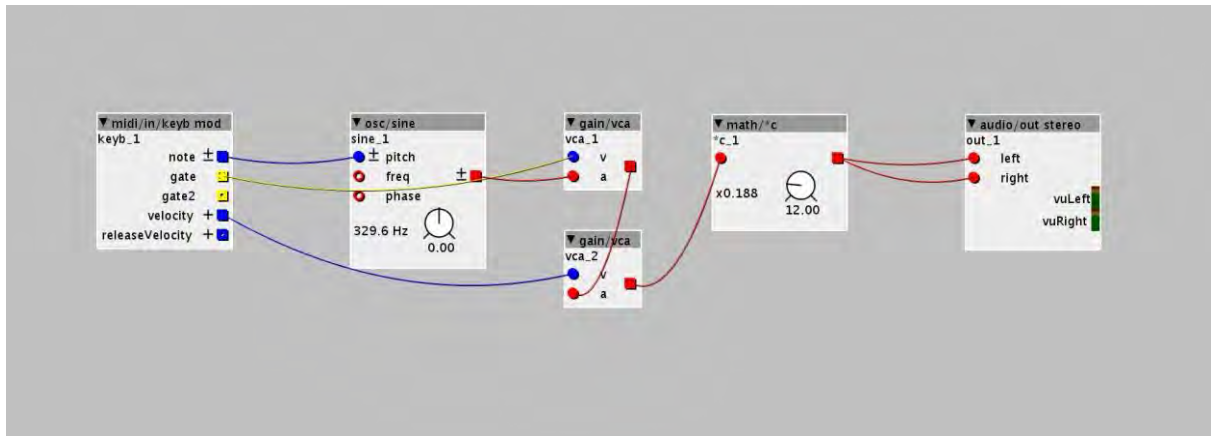


Рис.16 Модифікація патчу з використанням виходу velocity об'єкта midi/in/keyb mod

### 2.3 Створення патчу з використанням генератора обвідної

Більшість синтезаторів мають обвідні для управління гучністю або частотою фільтра. Зазвичай використовують обвідну ADSR що була розглянута у розділі 1.12.1. В даному випадку будемо використовувати обвідну для регулювання гучності. Для цього виконаємо наступні дії в середовищі Axoloti Patcher:

1. Знайдемо в бібліотеці об'єкт adsr і додамо його до попередньо створеного патчу.
2. Від'єднаємо провід від виходу об'єкта клавіатури до першого об'єкта gain/vca.
3. Підключимо вихід gate об'єкта клавіатури до входу об'єкта генератора ADSR.
4. Підключимо вихід об'єкта ADSR до синього входу першого об'єкта gain/vca.
5. Додамо до патчу об'єкт kscore 128 p. Цей об'єкт буде використовуватися для відображення сигналу генератора ADSR.
6. Підключимо вихід об'єкта ADSR до синього входу нового об'єкта kscore.

Правильне підключення всіх об'єктів у єдиний патч зображено на рисунку 17.

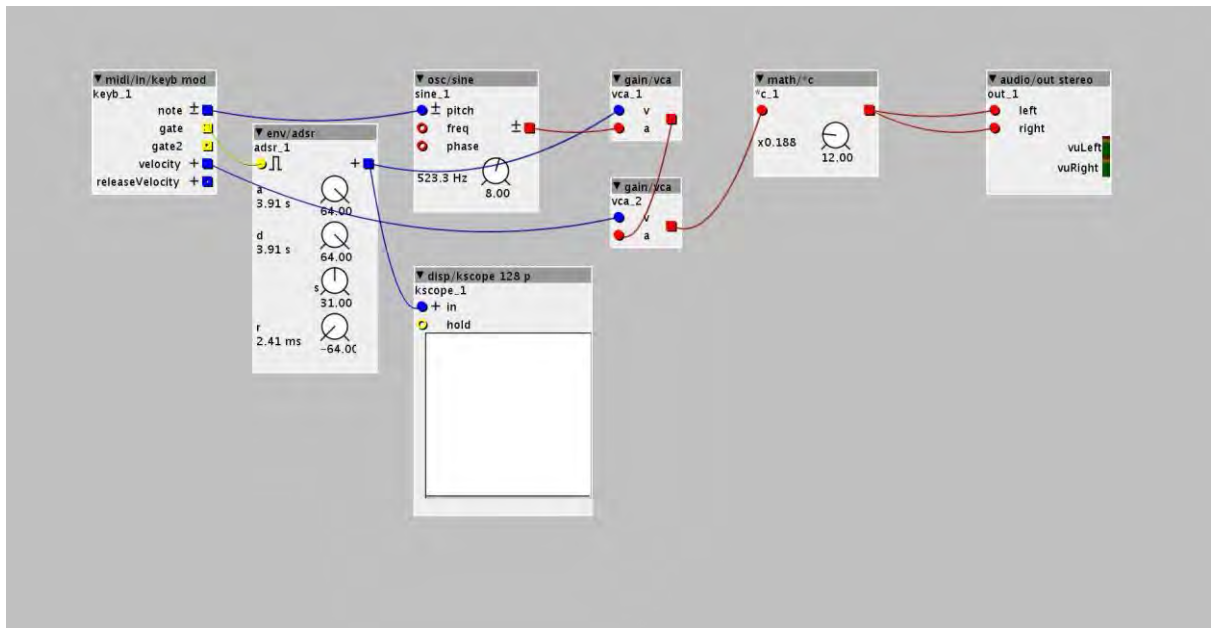


Рис.17 Модифікація патчу з використанням обвідної ADSR

Встановимо наступні параметри adsr об'єктів та запишемо сигнал за допомогою звукової карти.

Параметри об'єктів у прошивці:

Блок ADSR:

- Час attack: 3.91 с
- Час Decay 3.9 с
- Час Release 2.41мс

Час Sustain залежить від тривалості натиснення клавіші. Форма записаного сигналу відповідає параметрам обвідної, та зображена на рисунку 18. В даному випадку нас не цікавлять спектральні властивості сигналу, досліджується лише вплив генератору adsr обвідної на форму отриманого сигналу.

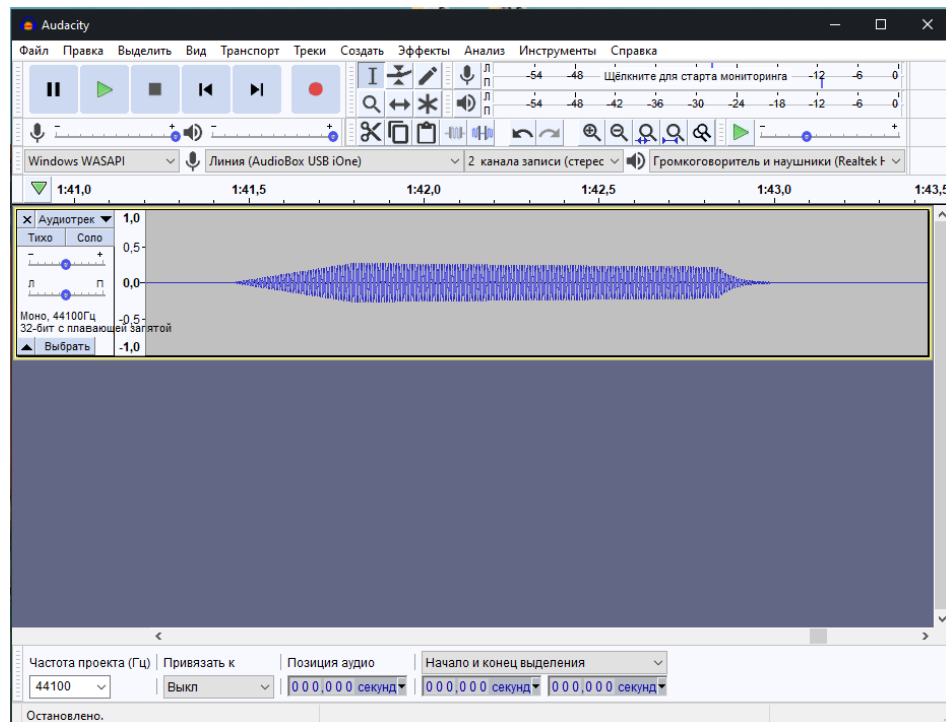


Рис. 18 Форма записанного сигналу

## 2.4 Реалізація алгоритму субтрактивного синтезу на мікроконтролері Axoloti Core

Алгоритм субтрактивного синтезу було розглянуто у розділі 1.2. Для реалізації цього алгоритму модифікуємо попередньо розглянутий патч. Замінімо осцилятор синусоїдальних хвиль на осцилятор пилкоподібних хвиль. Також додамо фільтр низьких частот та смуговий фільтр. Фільтри приєднаємо послідовно до виходу з осцилятора. Вихід об'єкту смугового фільтра підключимо до входу об'єкту gain\вса. Таким чином реалізовано тракт обробки сигналу що зображено на рисунку 2. Слід зазначити що частота зрізу обох фільтрів регулюється. Частоти зрізу для фільтра низьких частот та для смугового фільтра знаходиться в діапазоні від 18 Гц до 13 кГц. Також фільтри мають параметр резонансної частоти, за допомогою якого можна підсилити вибрану смугу частот. Осцилятор пилкоподібних хвиль має регульовану частоту основного тону в діапазоні від 8.176 Гц до 13.7 кГц. Патч для синтезатора з використанням алгоритму субтрактивного синтезу зображено на рисунку 19.



Рис.19 Алгоритм субтрактивного синтезу у середовищі Axoloti Patcher

Спектрограма сигналу отриманого на виході тракту зображена на рисунку 20. У даній дисертації всі спектрограми сигналів були виконані за допомогою метода Уелча [29]. Параметри об'єктів відповідають зображенням на рисунку 19.

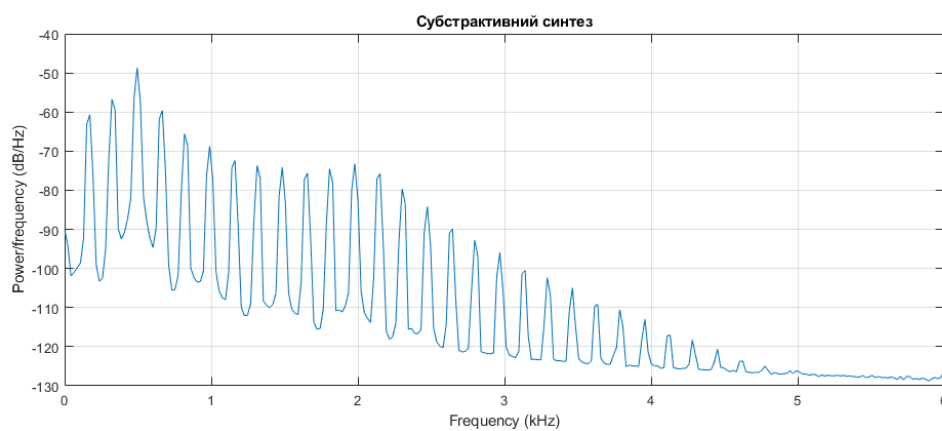


Рис. 20 Спектрограма сигналу отриманого субтрактивним синтезом

Для порівняння побудуємо спектрограму, отриману після вилучення фільтрів з тракту. Вона зображена на рисунку 21.

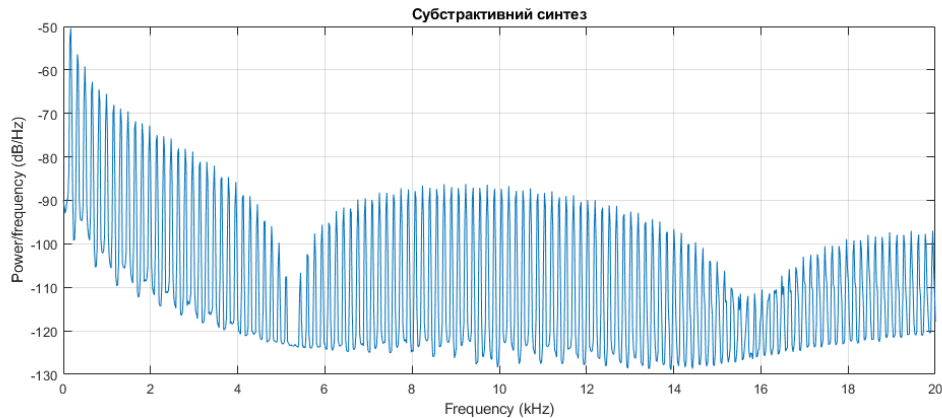


Рис. 21 Сигнал після видалення фільтрів з тракту обробки сигналу.

Порівнявши спектрограми сигналів зображених на рисунку 20 та 21 можна сказати що при використанні методу субтрактивного синтезу результат залежить від застосованих фільтрів та осцилятора. Робота параметрів резонансної частоти відображається у піках на спектрограмі зображеній на рисунку 20. Також на цьому рисунку показано як спрацював фільтр низьких частот. Фактично ми отримали відфільтрований сигнал пілоподібної форми.

Можна застосовувати різні фільтри, створювати каскади з фільтрів, але якщо застосовувати тільки метод субтрактивного синтезу, синтезатор буде звучати надто одноманітно. Цей метод синтезу не можна назвати гнучким.

## 2.5 Реалізація алгоритму адитивного синтезу на мікроконтролері Axoloti Core

Алгоритм адитивного синтезу було розглянуто у розділі 1.1. Для реалізації цього алгоритму створимо новий файл прошивки для мікроконтролера. Спростимо реалізацію використавши 3 осцилятора хвиль синусоїдальної форми.

Підключення відбувається наступним чином:

1. Вихід ноти об'єкта `midi/in/ keyb mod` має бути підключений до входу кожного з осциляторів.
2. Вихід кожного з осциляторів підключений до входу об'єктів `env/d`, що являє собою генератор обвідної яка регулює час спадання.

3. Для застосування кожного з генераторів обвідної потрібна відповідна кількість об'єктів gain/vca. Підключення цього блоку було розглянуте в розділі 2.1
4. Вихід кожного об'єкта gain/vca має бути підключений до об'єкту мікшера, що має 4 входи.
5. До сигналу на виході з мікшера застосовується adsr обвідна за допомогою відповідних об'єктів.
6. Сигнал подається на об'єкт math/c, потім до об'єкта аудіовиходу.

Кінцевий варіант файлу прошивки синтезатора з використанням алгоритму адитивного синтезу зображено на рисунку 22.

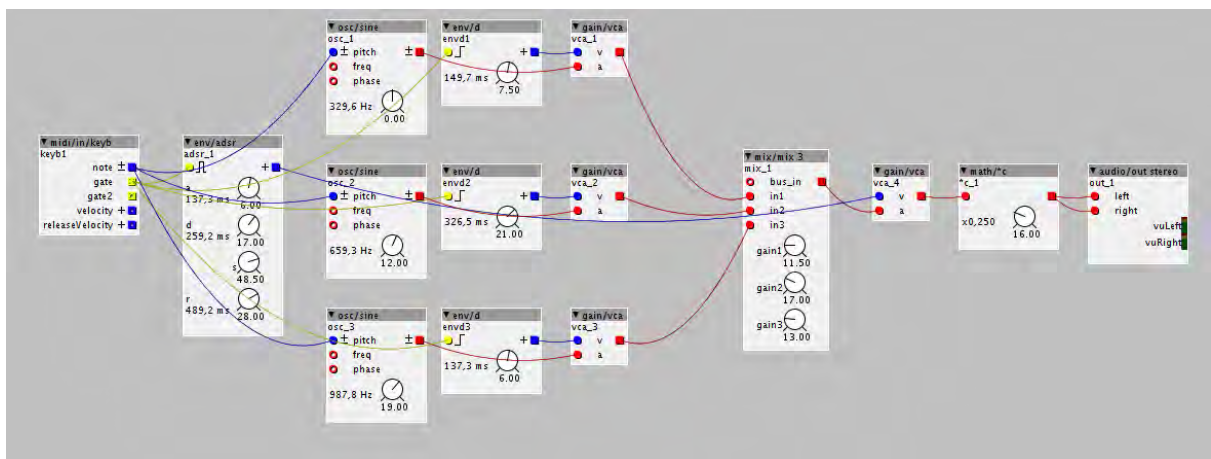


Рис. 22 Алгоритм адитивного синтезу у середовищі Axoloti Patcher

В даному випадку для кожного осцилятора синусоїдальних хвиль було встановлено наступні параметри: основна частота першого осцилятора 329 Гц, другого - 659 Гц, третього відповідно: 987 Гц. Час затухання сигналу кожного з осциляторів наступний: для першого осцилятора: 149 мс, для другого - 326 мс, для третього відповідно: 137 мс.

Форма та спектрограма сигналу отриманого на виході тракту зображена на рисунку 23. Параметри об'єктів відповідають зображеним на рисунку 20.



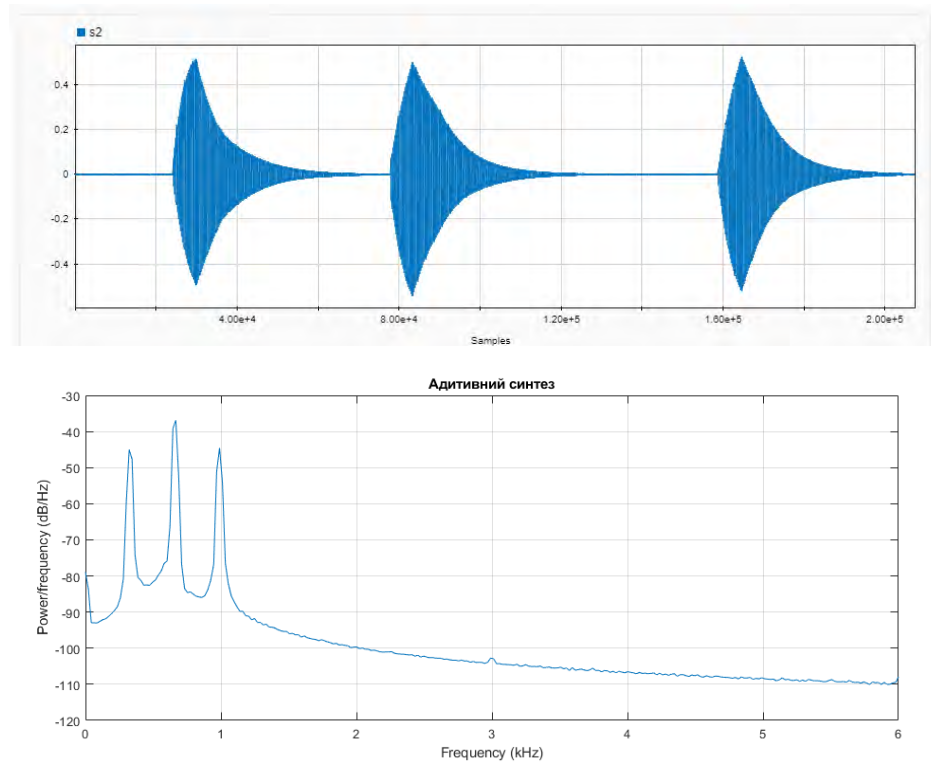


Рис.23 Спектрограма та форма сигналу отриманого адитивним синтезом

Як видно з рисунку 23, основні спектральні складові відповідають встановленим основним частотам осциляторів. Амплітуда кожного з піків частот регульована відповідно коефіцієнтам підсилення встановленим на об'єкті мікшера. Також на рисунку 23 добре видно результат роботи генератора `adsr`. В даному випадку класичний алгоритм адитивного синтезу, що зображений на рисунку 1, було модифіковано за допомогою обвідних згасання. Це дозволить зробити синтез більш гнучким за допомогою регулювання тривалості сигналу з кожного осцилятора.

Отже так як алгоритм адитивного синтезу базується на теоремі Фур'є, результат синтезу цілком залежить від кількості генераторів, сигнали яких складаються, та основних частот їх тону. Керуючи параметрами основної частоти, підсилення та тривалості кожної складової результуючого сигналу можна домогтись будь яких бажаних результатів. Але для цього кількість осциляторів повинна бути досить великою, а це зумовлює застосування більш дорогих компонентів для обчислення та обробки сигналу, що може бути економічно



невигідно. Також керування великою кількістю осциляторів не дуже зручне для виконавця.

## 2.6 Реалізація алгоритму синтезу фазової модуляції на мікроконтролері Axoloti Core

Синтез сигналів за допомогою частотної та фазової модуляції було розглянуто у розділі 1.3.2. Для реалізації цього алгоритму створимо новий файл прошивки для мікроконтролера. У файлі прошивки для синтезатора виконаємо частотну модуляцію сигналів синусоїдальної та пилкоподібної форми. Причому синусоїдальний сигнал є несучою а пилкоподібний - модулюючою. Для цього виконаємо наступні дії:

1. Додамо об'єкти осцилятора пилкоподібних хвиль `ocs/saw` та осцилятора синусоїдальних хвиль `ocs/sine`
2. Поєднаємо вихід `note` об'єкту `mid` клавіатури з входами `pitch` на обох осциляторах.
3. Вихід об'єкта `ocs/saw` підключимо на вхід об'єкта `math/^c`, що в даному випадку емулює індекс модуляції  $I$  з формули 4.
4. Вихід об'єкта `math/^c` підключимо до осцилятора синусоїдальних хвиль `ocs/sine` на вхід `phase`
5. Вихід об'єкту `ocs/sine` підключимо на вхід `vca`, до якого під'єднано об'єкт `adsr`.
6. Далі сигнал виводиться на аудіовихід як і у попередніх випадках.

Файл прошивки представлено на рисунку 24.

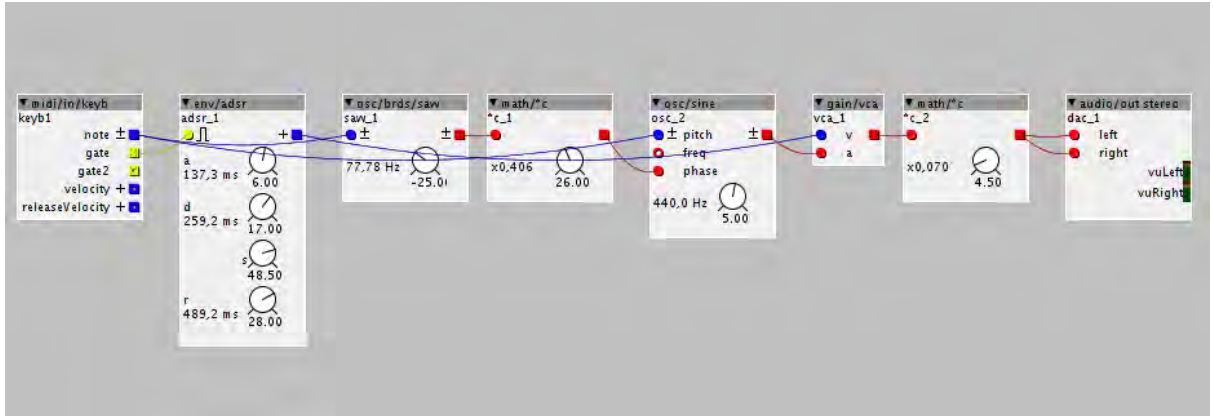


Рис. 24 Алгоритм РМ синтезу у середовищі Axoloti Patcher

Для осцилятора синусоїдальних хвиль, який в даному випадку відповідає за несучу, було встановлено основну частота 440 Гц. Для осцилятора пилоподібних хвиль, який в даному випадку відповідає за модулюючу, було встановлено основну частота 78 Гц. Значення такого параметру як індекс модуляції дорівнює 0.4. Форма та спектрограма сигналу отриманого на виході тракту зображена на рисунку 25. Параметри об'єктів відповідають зображенням на рисунку 24.

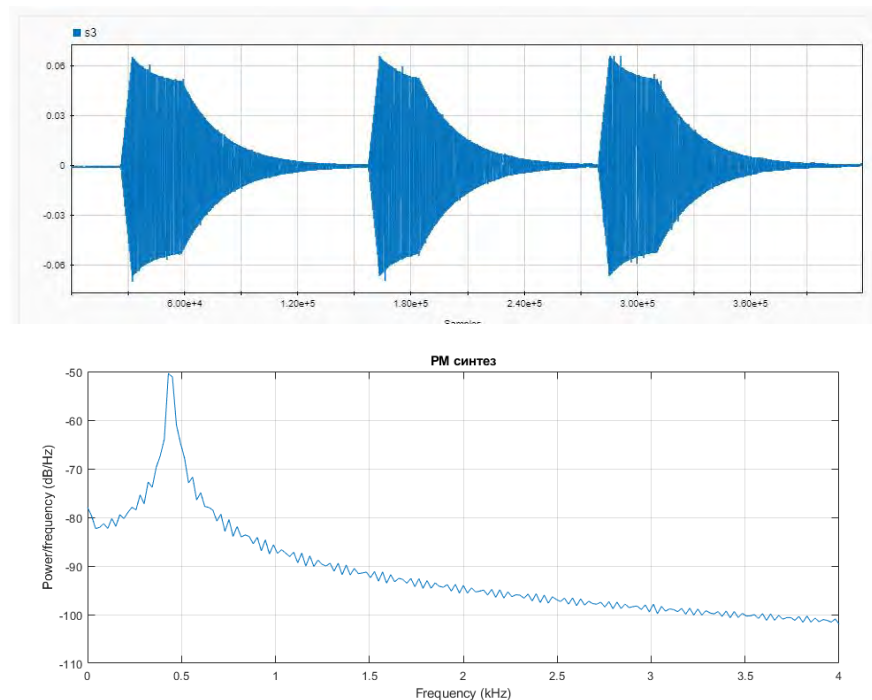


Рис.23 Спектрограма та форма сигналу отриманого РМ синтезом

З рисунку 23 можемо побачити чітко виражений пік частоти основного тону несучої. Збільшення індексу модуляції приводить до збільшення енергії на бічних смугах, розташовані симетрично навколо частоти несучої, це показано на рисунку 25. Де жовтою лінією позначено спектрограму при індексі модуляції 0.7, а синьою лінією позначено спектрограму при індексі модуляції 0.25.

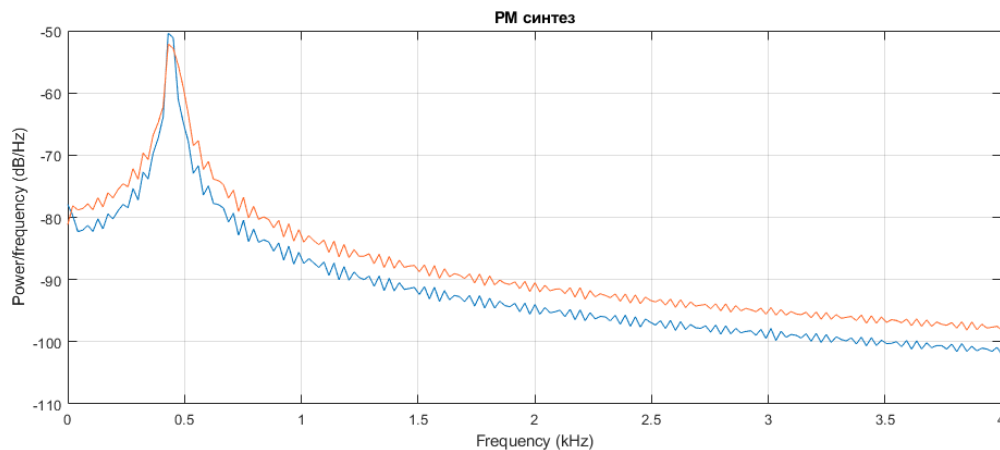


Рис.25 Порівняння спектрограм з різними індексами модуляції

Алгоритм РМ синтезу досить простий у виконанні так як не потребує великої кількості ресурсів обчислювальної техніки. Спектр сигналу тембрально багатий так як має багато додаткових гармонік, малих за амплітудою. Їх вплив можна збільшити керуючи індексом модуляції.

## 2.7 Використання LFO для синтезу звуку

Синтез сигналів з використанням осцилятора низьких частот (LFO) було розглянуто у розділі 1.12.2. Для реалізації цього алгоритму створимо новий файл прошивки для мікроконтролера. У файлі прошивки для синтезатора осцилятор низьких частот буде керувати модуляцією частоти осцилятора пилкоподібних сигналів. Для цього виконаємо наступні дії:

1. Додамо об'єкти осцилятора низьких частот синусоїдальної форми lfo/sine та осцилятора пилкоподібних хвиль osc/saw

2. Поєднаємо вихід об'єкту lfo/sine з входом об'єкту mix 1, за допомогою якого можна регулювати вплив lfo на частоту осцилятора пилоподібних хвиль.
  3. Вихід об'єкта mix 1 підключимо на вхід об'єкта osc/saw, що відповідає за частоту основного тону.
  4. Додамо об'єкт disp/chart b та підключимо його до виходу lfo, так ми зможемо відслідковувати форму сигналу з lfo у реальному часі.
  5. Додамо об'єкт scope 128 та підключимо його до виходу vca, так ми зможемо відслідковувати форму вихідного сигналу у реальному часі.
  6. Далі сигнал виводиться на аудіовихід як і у попередніх випадках.
- Файл прошивки представлено на рисунку 24.

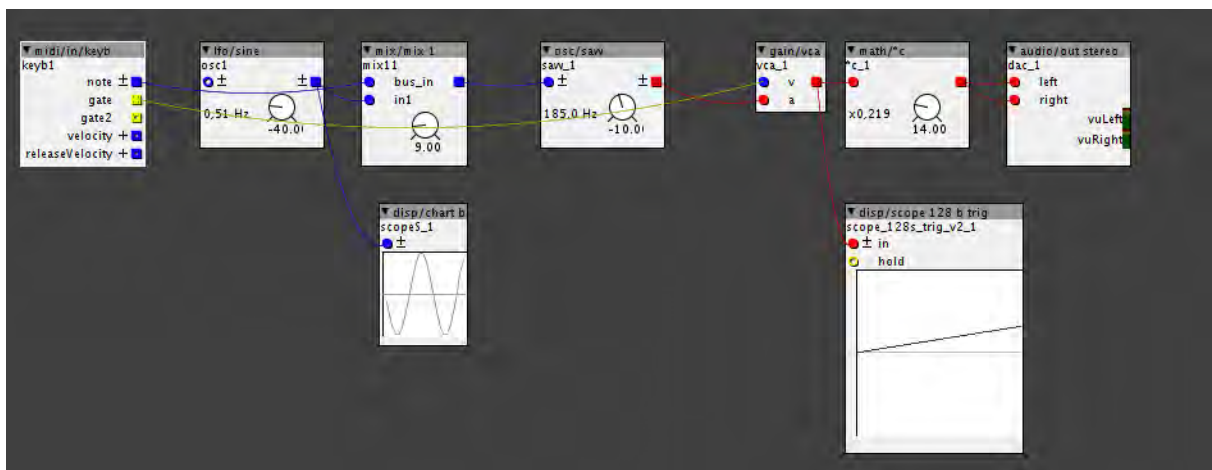


Рис. 26 Використання lfo для у середовищі Axoloti Patcher

Частота осцилятора низьких частот була встановлена 0.5 Гц. Глибина модуляції що встановлена об'єктом mix1 дорівнює 9. Частота осцилятора пилоподібних частот була встановлена 185 Гц. Спектр сигналу на виході тракту зображено на рисунку 27.

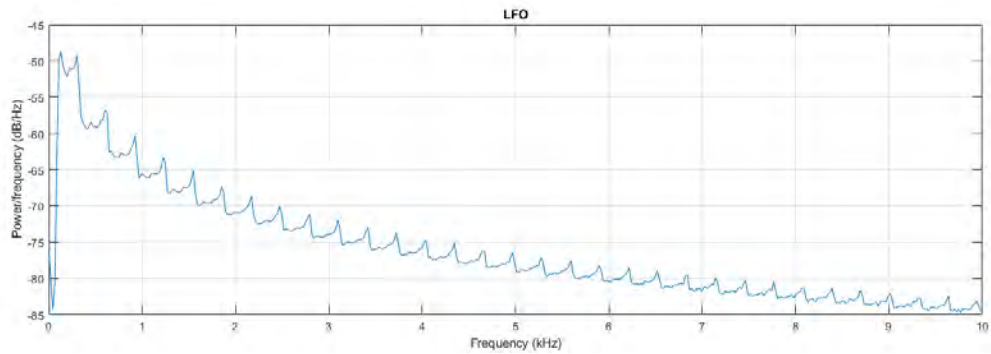


Рис. 27 Спектрограма пилоподібного сигналу з застосуванням LFO

На рисунку 28 зображено спектрограму сигналу при встановленні параметру глибини модуляції 0, тобто фактично без використання LFO, значення інших параметрів відповідає тому що і у попередньому випадку.

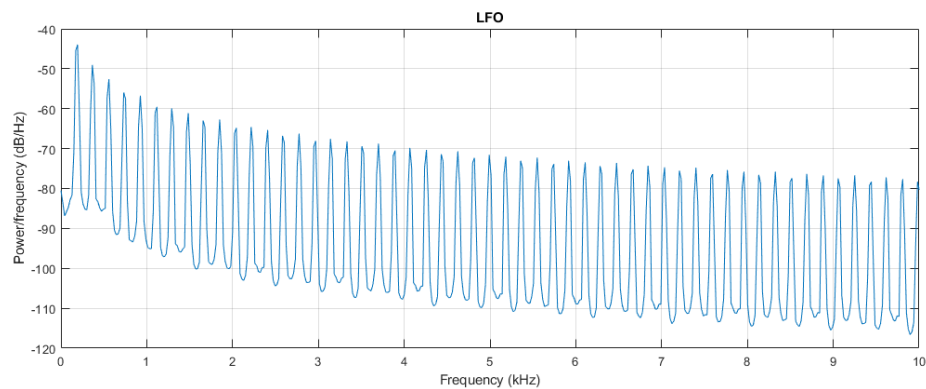


Рис. 28 Спектрограма пилоподібного сигналу без застосуванням LFO

З порівняння рисунків 27 та 28 видно що спектр сигналу з застосуванням LFO має виражені частотні піки, розташовані з однаковою періодичністю. Це усереднений спектр сигналу. LFO змінює пікове значення частоти основного тону в реальному часі з певною періодичністю, що задана частотою LFO. Це надає звучанню синтезатора динамічності, навіть якщо не застосовувати генератори обвідних. Отже змінюючи параметри LFO можна впливати на частотний спектр змінюючи періодичність розташування частотних піків.

## 2.8 Синтез звуку за допомогою алгоритма Карплуса-Стронга

Синтез Карплуса-Стронга було детально розглянуто в розділі 1.5. Файл прошивки мікроконтролера з використанням цього алгоритму зображено на рисунку 29.

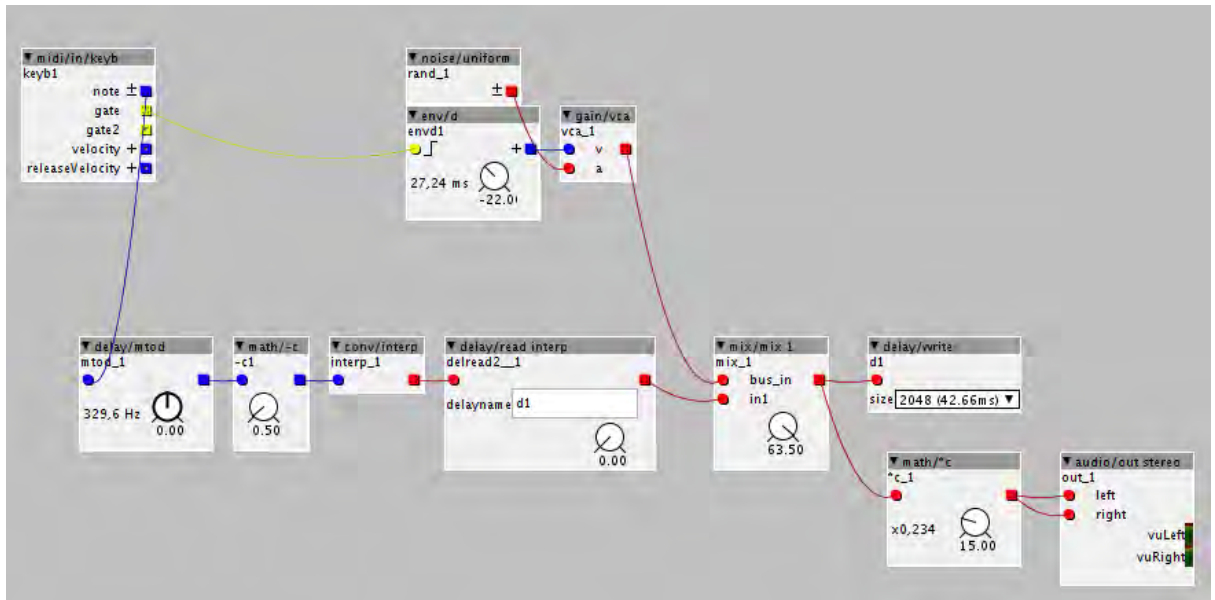


Рис. 29 Синтез Карплуса-Стронга в середовищі Axoloti Patcher

Об'єкт `noise/uniform` генерує білий шум, тривалість якого регулюється об'єктом `env/d` що являє собою генератор обвідної затухання. Об'єкти `delay/mtod`, `math/-c` та `conv/interp` підключені між собою послідовно представляють собою модифікатор. Об'єкти `delay/read/interp` та `delay/write` виконують функцію лінії затримки. Об'єкт `mix` об'єднує модифікатор та лінію затримки з шумовим імпульсом. Далі сигнал подається на аудіовихід. Спектрограму сигналу зображено на рисунку 30.

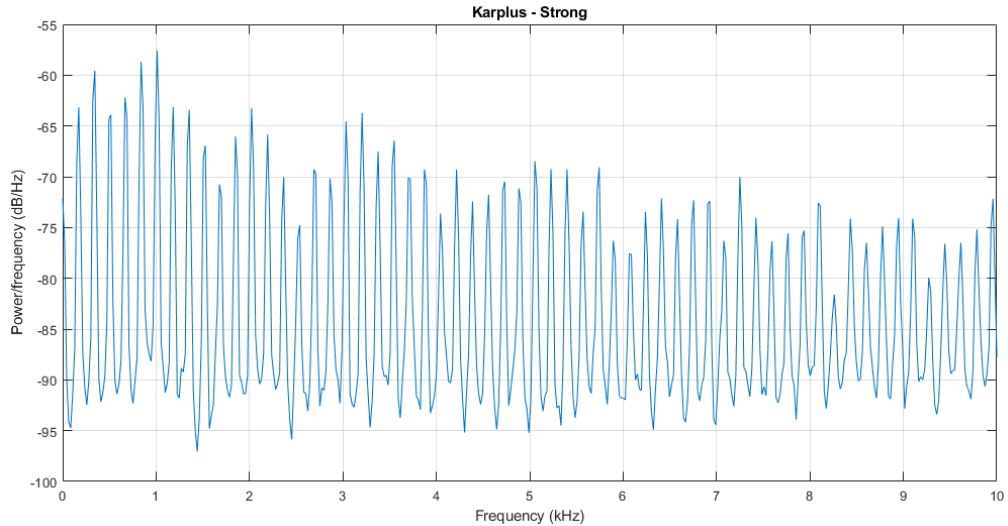


Рис.30 Спектр сигналу синтезованого за алгоритмом Карплуса-Стронга

Основна частота модифікатора (об'єкта delay/mtod) встановлена на 329 Гц. Тривалість шумового імпульсу встановлена на 27 мс. Даний метод синтезу створено щоб синтезувати звук струнних інструментів, тож порівняймо спектр отриманого сигналу з спектром струни акустичної гітари [30], нота E4 (329 Гц), що зображено на рисунку 31.

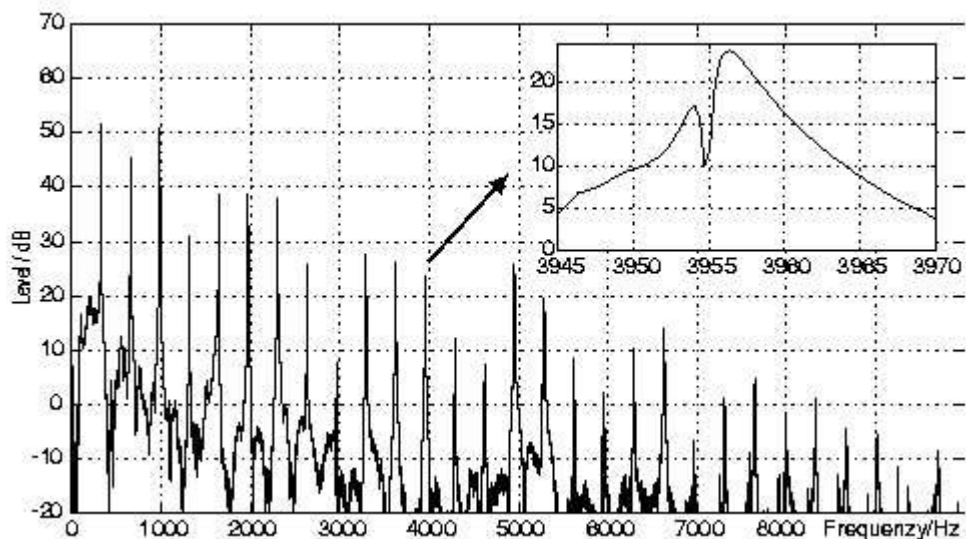


Рис.31 Спектр акустичної гітари, нота E4



З порівняння рисунків 30 та 31 видно що спектр сигналу синтезованого за алгоритмом Карплуса-Стронга подібний до спектру акустичної гітари. Вони мають подібні пікові частоти такі як 1000 Гц та 330 Гц, але сигнал синтезований алгоритмом Карплуса-Стронга має більшу кількість гармонічних складових, як наприклад на частоті 839 Гц. Ці гармонічні складові мають більші амплітуди, в порівнянні з спектром акустичної гітари. Тому не дивно що звук синтезованого сигналу звучить досить неправдоподібно.

## 2.9 Реалізація синтезу звуку методом таблицно-хвильового синтезу на мікроконтролері Axoloti Core

Таблицно-хвильовий синтез було детально розглянуто в розділі 1.6. Файл прошивки мікроконтролера з використанням цього алгоритму зображено на рисунку 32.



Рис. 32 Таблично хвильовий синтез у середовищі Axoloti Patcher

За допомогою об'єкта `table/allocate 32b` можна графічно задати форму хвилі. Тобто таблиця параметрів буде сформована автоматично виходячи з форми хвилі, що сформована через даний об'єкт. Як джерело сигналу використовується осцилятор пилкоподібних хвиль. Сигнал з осцилятора проходить через об'єкти `table/read` та `table/read interp`. Саме ці об'єкти надають сигналу форму що задана об'єктом `table/allocate 32b`. Об'єкти `table/read` та `table/read interp` відрізняються тим,



що `table/read interp` використовує інтерполяцію для округлення а `table/read` використовує усічення. За допомогою об'єкта `ctrl/toggle` та `mix 2` відбувається перемикання між об'єктами `table/read` та `table/read interp`, тобто таким чином можна обрати метод округлення для хвильової таблиці.

Також в даній прошивці реалізована частотна модуляція за допомогою LFO. Через об'єкт `lfo/sine` можна контролювати частоту основного тону осцилятора низьких частот синусоїдальної форми. Об'єкти `math/^c` використовуються для керування глибиною модуляції. Спектрограма сигналу на виході тракту зображена на рисунку 33.

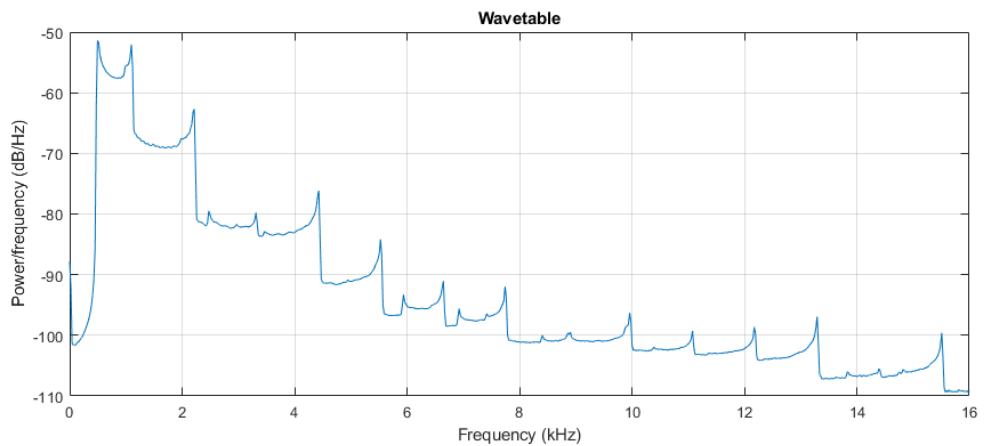


Рис. 33 Спектр сигналу синтезованого за алгоритмом Wavetable, спосіб округлення-інтерполяція

Частота осцилятора низьких частот буда встановлена 1 Гц. Глибина модуляції що встановлена об'єктом `mix1` дорівнює 0.1. Частота осцилятора пилкоподібних частот була встановлена 740 Гц. Метод округлення для хвильової таблиці - інтерполяція.

Не змінюючи вищевказаних параметрів запишемо сигнал використовуючи метод округлення-усічення. Спектрограма такого сигналу зображена на рисунку 34

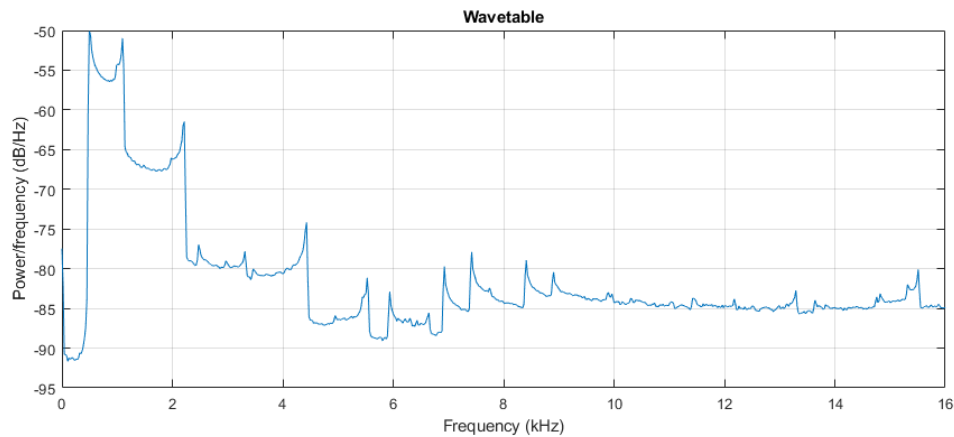


Рис. 34 Спектр сигналу синтезованого за алгоритмом Wavetable, спосіб округлення-усічення.

З порівняння рисунків 33 і 34 можна сказати що зміна способу з інтерполяції на усічення спричиняє зміни в високих частотах спектру, додаючи шум в гармонічну складову. Це відбувається тому що такий спосіб округлення як усічення спричиняє виникненню шуму квантування у вихідному сигналі. Тож слід застосовувати інтерполяцію як метод округлення щоб уникнути шумових складових в спектрі для таблично-хвильового методу синтезу.

Не змінюючи вищевказаних параметрів осциляторів задамо іншу форму хвилі об'єкта `table/allocate 32b`, зафіксуємо форму сигналу на виході з тракту, та спектрограму отриманого сигналу. Спектрограма сигналу зі зміненою формою хвилі зафіксована на рисунку 35.

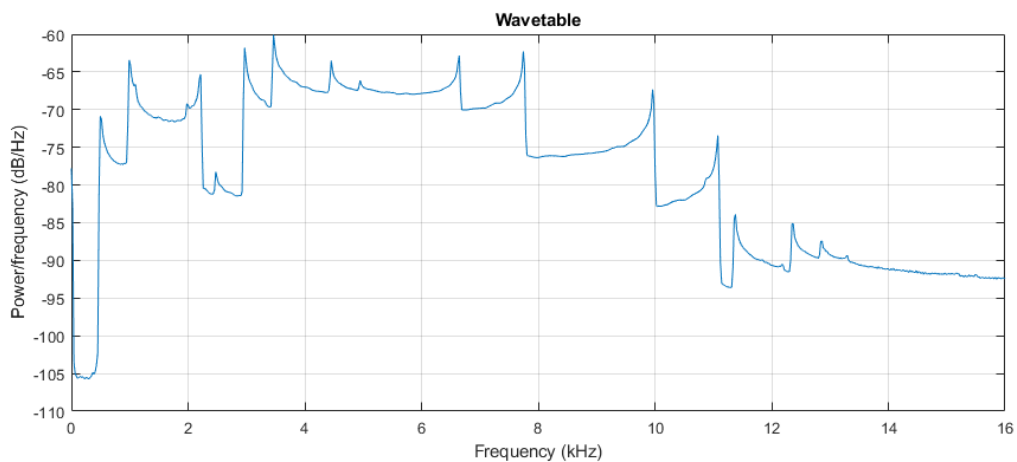


Рис. 35 Використання іншої форми хвилі об'єкта table/allocate 32b

З рисунку 35 видно як змінився спектр сигналу зі зміною хвильової таблиці. Тобто можна зробити висновок для даного методу синтезу основним інструментом для впливу на тембр сигналу є хвильова таблиця. Також на гармонічні складові тембру впливає модуляція осцилятором низьких частот. Так як спектр сигналу схожий на той що представлений у розділі 2.6. Таблично-хвильовий метод синтезу звуку найбільш гнучкий з всіх методів розглянутих у даній роботі так як дозволяє змінювати тембральні характеристики сигналу в реальному часі, та не потребує великої кількості обчислень. Також модуляція широко застосовується в цьому методі що дозволяє проводити ще більше маніпуляцій зі спектром сигналу на виході, вносячи динаміку в звучання. Але реалізація цього способу синтезу на даному мікроконтролері дає можливість змінювати хвильову таблицю графічним методом тільки у випадку підключення мікроконтролера до ПК. При розробці

незалежного від ПК пристрою можна використовувати тільки заздалегідь записані в пам'ять хвильові таблиці. Це є недоліком реалізації даного методу синтезу на мікроконтролері Axoloti Core.

## **2.10 Порівняння реалізацій методів синтезу на Axoloti Core**

Реалізація кожного з методів синтезу що була розглянута в даному розділі має свої переваги та недоліки. Субтрактивний синтез простий у реалізації, але для створення цікавого для слухача звучання потрібно досить точно налаштовувати каскад фільтрів та ефекти. Використовуючи адитивний синтез для бажаного результату потрібно використовувати велику кількість осциляторів, а значить налаштовувати параметри для кожного з них. Це може бути незручно для виконавця. Також слід зазначити що велика кількість осциляторів потребує великої кількості обчислень, тобто цей метод більш затратний. Метод фазової модуляції не потребує багато параметрів для налаштування, має багатий тембр та не потребує великої кількості обчислень. Також досить гнучким є метод хвильових таблиць так як дозволяє радикально змінювати спектральні характеристики сигналу майже миттєво. Особливо якщо використовувати його в парі з LFO для частотної модуляції. Але його функціонал значно обмежується при використанні на даному мікроконтролері, так як підключення периферії, що дозволить графічно контролювати форму хвилі сигналу не є можливим. Метод Карплуса-Стронга досить обмежений так як використовується для синтезу сигналів що імітують струні. Реалізація цього алгоритму на Axoloti Core видає досить неточний результат в порівнянні з справжніми струнними.

В сучасних синтезаторах тільки один метод синтезу майже не використовується. Зазвичай використовують декілька методів об'єднаних в один тракт, або модульно. Це робить синтезатор більш універсальним для створення цікавого звучання.

### 3. РОЗРОБКА СИНТЕЗАТОРА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА AXOLOTI CORE

#### 3.1 Способи апаратної реалізації синтезатора звуку на основі мікроконтролера Axoloti Core

Більшість нових MIDI контролерів працюють з USB, що робить їх мобільними. Єдина проблема цих USB MIDI-контролерів полягає в тому, що їх не можна підключити їх до старих синтезаторів. Більшість старовинних синтезаторів та ударних машин використовують п'ятиконтактний роз'єм DIN. Деякі MIDI-контролери мають роз'єми USB і DIN MIDI, тому їх можна використовувати з комп'ютерами та старовинним обладнанням.

Axoloti Core підтримує MIDI через USB, а також DIN. Таким чином, можна підключити до нього практично будь-який MIDI-контролер, і він буде працювати.

Підключення USB MIDI-контролера відбувається через стандартний кабель USB-A-USB-B. Зверніть увагу, що MIDI-контролер USB повинен працювати без встановлення власних драйверів. Список працюючих контролерів USB MIDI можна знайти за посиланням [31].

В даній роботі для апаратної розробки синтезатора буде використовуватись MIDI клавіатура AKAI LPK25, що підключається через USB роз'єм.

Axoloti Core має тільки 15 входів для підключення периферії. Тому прошивка синтезатора побудована з розрахунку що доступно лише 15 потенціометрів для керування параметрами осциляторів, генераторів обвідної, LFO і т.д. Опір потенціометрів має бути зі значенням від 2,2 кОм до 47 кОм, вони мають бути лінійні. Потенціометри слід паяти до роз'ємів VDDA, оскільки це дасть найкращий сигнал для підключення аналогових компонентів. Рисунок 36 показує спосіб підключення потенціометра до плати Axoloti Core.

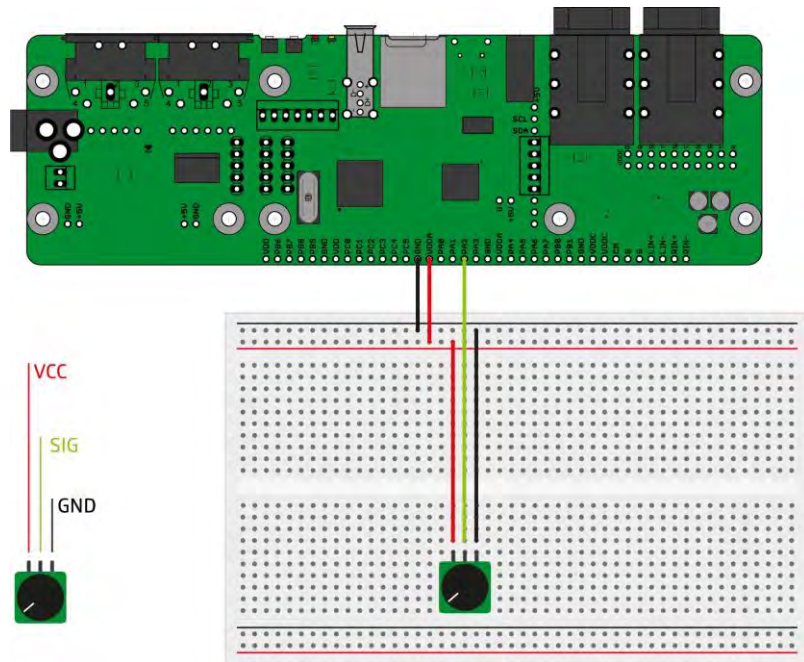


Рис. 36 Приклад підключення потенціометру до Axoloti Core

Програмно прив'язати потенціометр до параметра на будь якому об'єкті можливо за допомогою об'єкту `gpio / in / analog`. Параметр каналу повинен бути встановлений на ім'я припою, який ви використовували для підключення потенціометра. Приклад застосування `gpio / in / analog` зображено на рисунку 37.

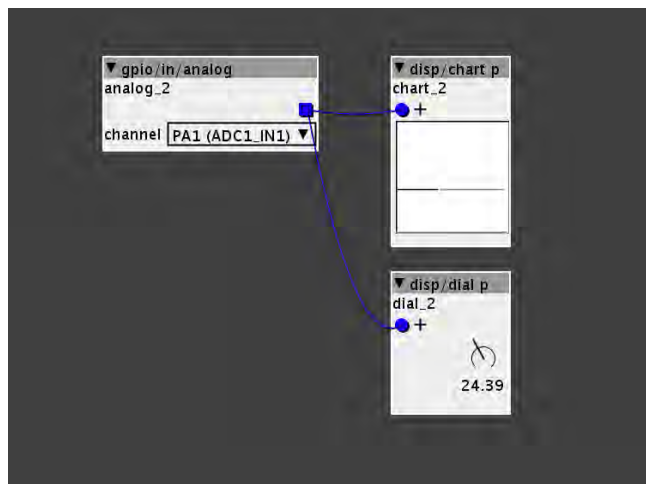


Рис.37 Приклад застосування `gpio / in / analog` для підключення потенціометра.

Повернувши потенціометр, можна, як змінюється сигнал на об'єкті disp/chart p. Об'єкт disp/dial буде відображати положення потенціометра. Тож для апаратної реалізації буде використано 15 потенціометрів, що будуть припаяні до відповідних роз'ємів на платі мікроконтролеру. Програмно на кожний з потенціометрів буде вибрано для керування певного параметру об'єкта. Плата та потенціометри будуть зібрані у єдиний корпус. Midi клавіатура буде підключатись через USB роз'єм.

### **3.2 Використання атрактору Лоренца для частотної модуляції**

У розділі 1.12.2 розглядалося використання осцилятора низьких частот. Частіше всього його використовують для джерела амплітудної або частотної модуляції. Він робить звучання більш динамічним, періодично змінюючи амплітуду або основну частоту сигналу. Це досить відомий і широко використаний прийом.

В даній дисертації замість осцилятора низьких частот для частотної модуляції буде використано математичну модель дивного атрактору Лоренца. Таким чином можна можна досягти більш хаотичного звучання синтезатора. Але при цьому воно буде більш згладжене, ніж у випадку використання просто LFO з випадковою частотою.

Дивний атрактор Лоренца — атрактор, що демонструє хаотичну поведінку і є розв'язком системи трьох нелінійних диференціальних рівнянь, вперше записаних в 1963 році Едвардом Лоренцом при розгляді конвекційного руху в однорідному шарі рідини, що підігривається знизу. Рівняння Лоренца також описують конвекцію в кільцевій трубці [32] та поведінку одномодового лазера. Належить до класу так званих дивних атракторів. Варто зазначити, що терміни «хаос» та «дивний атрактор» не вживалися в оригінальній роботі Лоренца, натомість йшлося про аперіодичні рухи. Модель Лоренца є реальним фізичним прикладом динамічних систем з хаотичним поведінкою. Математичний опис атрактора Лоренца [33] представляє собою систему з трьох диференційних рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x), \\ \frac{dy}{dt} &= x(\rho - z) - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - \beta z.\end{aligned}$$

де константи  $\sigma, \rho$  та  $\beta$ - це системні параметри. Вони пропорційні числу Прандтля та числу Релея,  $\beta = 8/3$ . Рівняння описують швидкість зміни трьох величин відносно часу. Змоделюємо поведінку системи Лоренца у середовищі MATLAB. Задамо наступні значення для параметрів  $\sigma = 10, \rho = 28$ , та  $\beta = 8/3$ . Рішення системи Лоренца для відліків від 0 до 100 показано на рисунку 38.

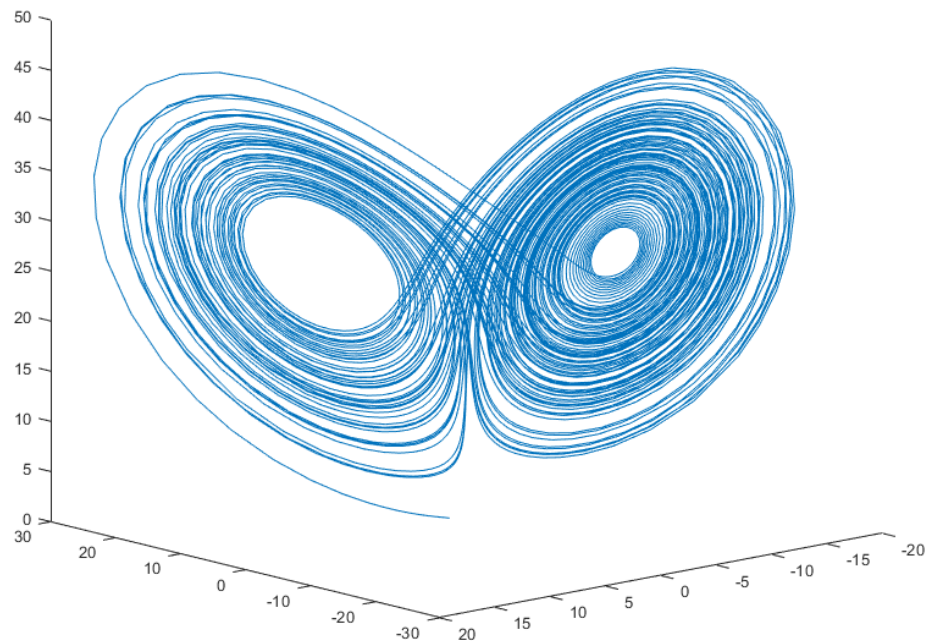


Рис. 38 Поведінка системи Лоренца при  $\sigma = 10, \rho = 28$ , та  $\beta = 8/3$

$\rho = 28$  класичне значення параметра, розглянуте в статті Лоренца. Всі три стану рівноваги є нестійкими і траєкторії з їхніх околиць притягуються до хаотичного (локального) аттрактору (який таким чином самозбуджується щодо всіх станів рівноваги). Хаотичний аттрактор має дробову ляпуновську розмірність, для якої



аналітична оцінка зверху може бути отримана аналітично через форму ляпуновської розмірності глобального атрактора, а оцінка знизу може бути отримана аналітико-чисельно через ляпуновську розмірність нестійких періодичних траєкторій атрактора [34], [35].

Бібліотека об'єктів Axoloti Patcher має об'єкт `lorenz_lfo` що являє собою математичну модель дивного атрактору Лоренца, реалізовану в даному середовищі. Розглянемо приклад використання цього об'єкта на рисунку 39.



Рис. 39 Приклад використання атрактору Лоренца у середовищі Axoloti Core

Для даної прошивки розв'язки системи Лоренца для  $x$  керують частотою основного тону першого осцилятора синусоїдальних хвиль. Відповідно розв'язки системи Лоренца для  $y$  керують частотою основного тону другого осцилятора синусоїдальних хвиль. Сигнали на виході кожного з осциляторів складаються та подаються на аудіовихід. Також слід зазначити що об'єкт `constnt/i` являє собою ціле число що використовується для збудження атрактора. Спектрограма отриманого сигналу зображена на рисунку 40.

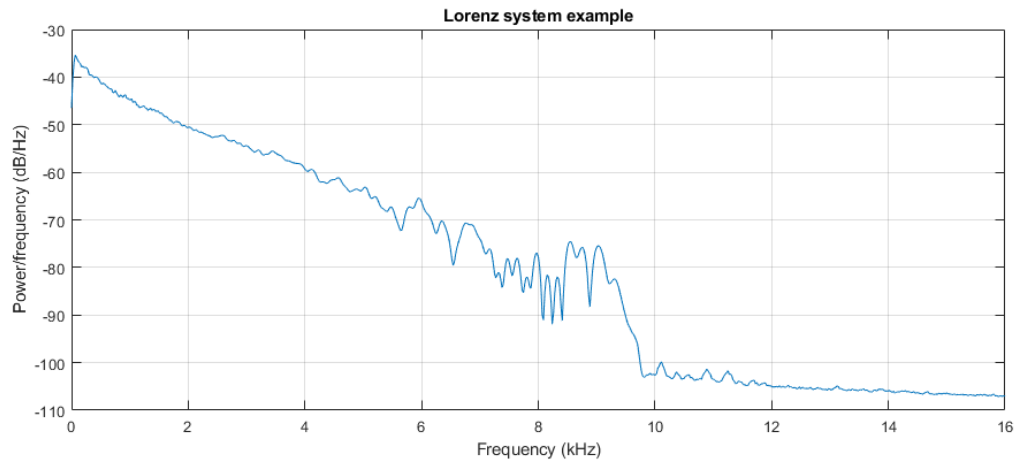


Рис.40 Спектрограма сигналу що керується атрактором Лоренца

С рисунку 40 видно що енергія сигналу спадає зі зростанням частоти, але саме на частотах в діапазоні з 5 кГц до 10 кГц показані гармонічні складові, які мають основний вплив на звучання сигналу з точки зору виконавця.

### 3.3 Програмна реалізація синтезатора звуку на основі мікроконтроллера Axoloti Core

Для програмної реалізації синтезатора буде використано декілька видів синтезу, попередньо розглянутих у першому розділі. А саме: адитивний синтез та синтез фазової модуляції. Також буде реалізовано використання дивного атрактору Лоренца для можливості частотної модуляції сигналу з осциляторів. Кінцевий варіант прошивки для синтезатора звуку зображено на рисунку 41.

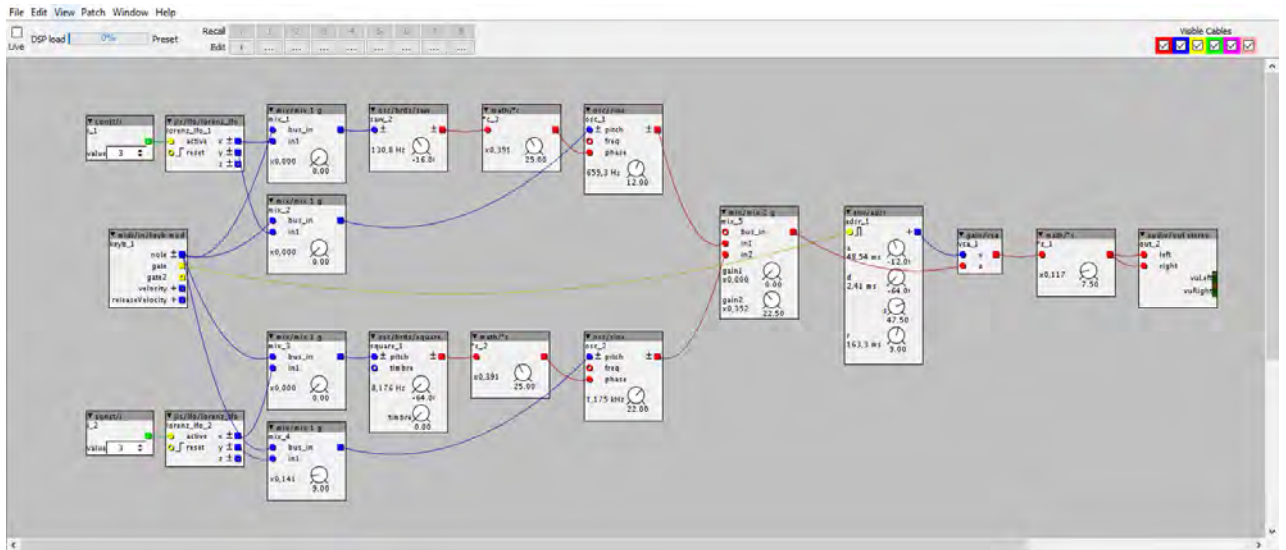


Рис. 41 Кінцевий варіант прошивки для синтезатора звуку

Розглянемо призначення об'єктів та їх підключення між собою щоб створити цілісне уявлення про функціонал синтезатора.

- Об'єкт `midin/keybd` відповідає за зв'язок з midi клавіатурою. Параметр `note` цього об'єкта контролює частоту основного тону кожного з осциляторів. Параметр `gate` дозволяє використовувати генератор обвідної `adsr`.

- Об'єкт `env/adsr` представляє собою генератор ADSR-обвідної, що змінює форму сигналу у часі згідно параметрів, що були детально розглянуті у розділі 1.12.1. Тривалість параметрів ADSR обвідної визначаються користувачем.

- Два об'єкти `lorenz_lfo` що являють собою математичну модель дивного атрактору Лоренца, використовуються для частотної модуляції кожного з чотирьох осциляторів. При чому для кожної пари осциляторів (що використовують фазову модуляцію) розв'язки системи Лоренца для  $x$  керують частотою основного тону модулюючої, а розв'язки системи Лоренца для  $y$  керують частотою основного тону несучої.

- Чотири об'єкти `mix/mix 1g` визначають величину впливу атракторів Лоренца на осцилятори. Інакше кажучи визначають глибину модуляції. Якщо глибина модуляції дорівнює нулю, атрактор Лоренца не впливає на частоту основного тону осцилятора.

- Перший блок фазової модуляції складається з осцилятора пилкоподібних хвиль, об'єкту  $\text{math}/^{\wedge}\text{c}$  та осцилятора синусоїдальних хвиль з'єднаних між собою. Осцилятор синусоїдальних хвиль відповідає за несучу, осцилятор пилкоподібних хвиль відповідає за модулюючу, Об'єкт  $\text{math}/^{\wedge}\text{c}$  відповідає за індекс модуляції.

- Другий блок фазової модуляції складається з осцилятора прямокутних хвиль, об'єкту  $\text{math}/^{\wedge}\text{c}$  та осцилятора синусоїдальних хвиль з'єднаних між собою. Осцилятор синусоїдальних хвиль відповідає за несучу, осцилятор прямокутних хвиль відповідає за модулюючу, Об'єкт  $\text{math}/^{\wedge}\text{c}$  відповідає за індекс модуляції.

- Об'єкт  $\text{mix}/\text{mix } 2\text{g}$  використовується для адитивного синтезу сигналів з двох пар осциляторів, що пов'язані між собою фазовою модуляцією. Амплітуду кожного з сигналів можна змінювати, тож таким чином можна використовувати лише одну пару осциляторів за потреби.

- Об'єкт  $\text{vca}$  приймає сигнал на виході з об'єкта  $\text{mix}/\text{mix } 2\text{g}$  та застосовує до нього обвідну що сформована блоком  $\text{adsr}$

- Блок  $\text{^c}_1$  це блок зміни гучності сигналу на виході тракту.

- Блок  $\text{out}_1$  виводить результуючий сигнал на фізичний вихід: роз'єм TRS на платі мікроконтролера.

Так як спектрограми реалізації алгоритму фазової модуляції вже були розглянуті раніше у розділі 2.6, розглянемо спектрограми сигналів на виході синтезатора з застосуванням атрактору Лоренца та без нього. Також використаємо адитивний синтез. Для всіх спектрограм використаємо керуючий тестовий сигнал як ноту E4 на міді клавіатурі. Спектрограма сигналу без застосування атрактору Лоренца зображена на рисунку 42.

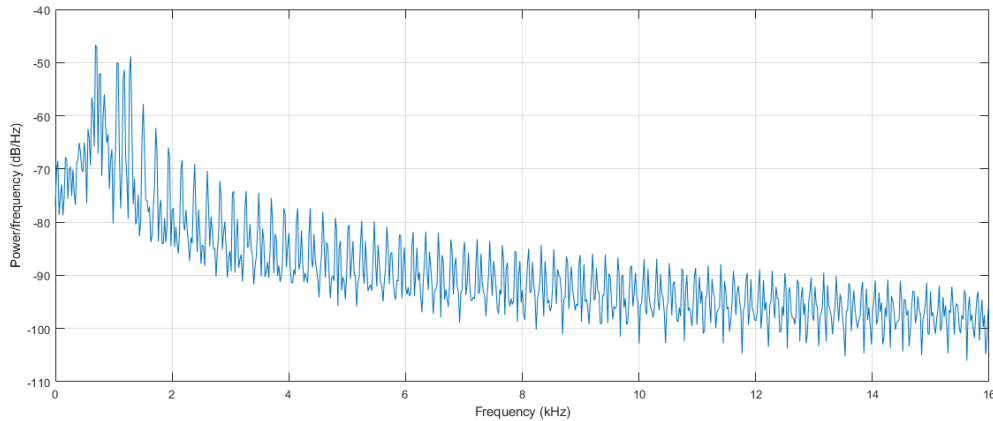


Рис.42 Спектрограма сигналу на виході синтезатора без застосування атрактору Лоренца

Для синтезатора були застосовані наступні параметри:

Для першого блоку фазової модуляції: основну частоту несучої було встановлено 698 Гц. Основна частота модулюючої 130 Гц. Значення індексу модуляції дорівнює 0.7.

Для другого блоку фазової модуляції: основну частоту несучої було встановлено 1175 Гц. Основна частота модулюючої 220 Гц. Значення індексу модуляції дорівнює 0.7. Сигнали додаються в блоці міх 2g з однаковою амплітудою. З рисунку 42 видно що пікові значення відповідають основним частотам несучих, також слід зазначити що відносно висока амплітуда бічних гармонічних складових зумовлена високим індексом модуляції. Розглянемо спектрограму сигналу, при тих самих параметрах, але з впливом атракторів Лоренца на осцилятори з першого блоку фазової модуляції. Глибину модуляції встановимо на 12 для обох осциляторів. Спектрограма отриманого сигналу зображена на рисунку 43.

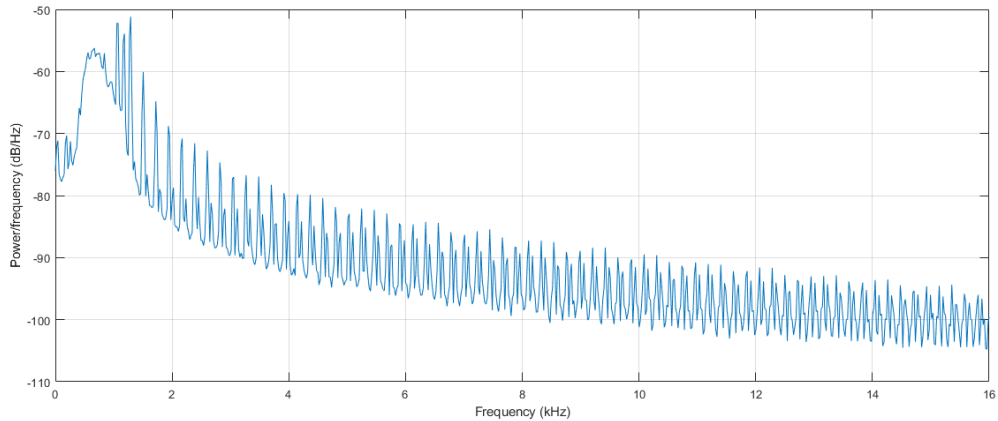


Рис. 43 Спектрограма сигналу на виході синтезатора з застосуванням атрактору Лоренца для першого блоку фазової модуляції

З рисунку 43 видно що частотний пік, який був створений першим блоку фазової модуляції, став більш згладженим, а бічні гармоніки змінили форму. Тепер всі бічні гармоніки повністю залежать від другого блоку фазової модуляції. Тепер розглянемо спектрограму сигналу, при тих самих параметрах, але з впливом атракторів Лоренца на осцилятори з другого блоку фазової модуляції. Глибину модуляції встановимо на 12 для обох осциляторів. Спектрограма отриманого сигналу зображена на рисунку 44.

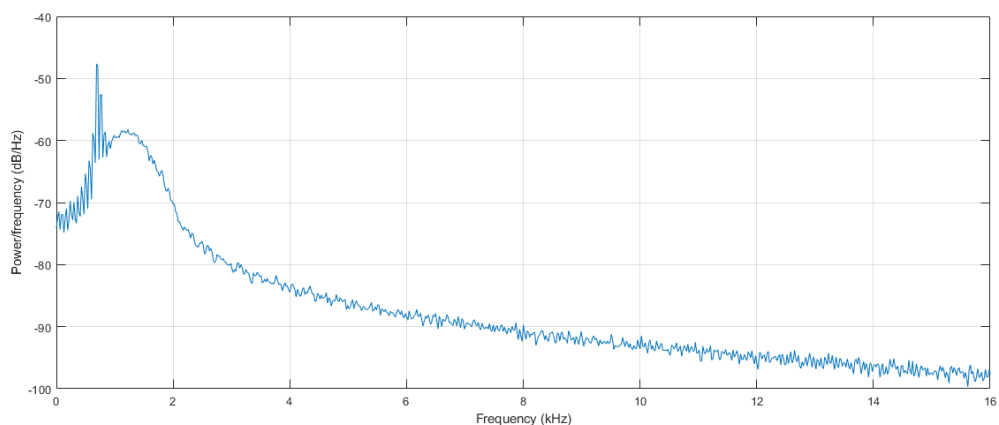


Рис. 44 Спектрограма сигналу на виході синтезатора з застосуванням атрактору Лоренца для другого блоку фазової модуляції

З рисунку 44 видно що частотний пік, який був створений другим блоку фазової модуляції а також бічні гармоніки що створені ним, стали більш згладженим. Тепер всі бічні гармоніки повністю залежать від першого блоку фазової модуляції. Тепер розглянемо спектрограму сигналу, при тих самих параметрах, але з впливом атракторів Лоренца обидва блоки фазової модуляції. Спектрограма отриманого сигналу зображена на рисунку 45.

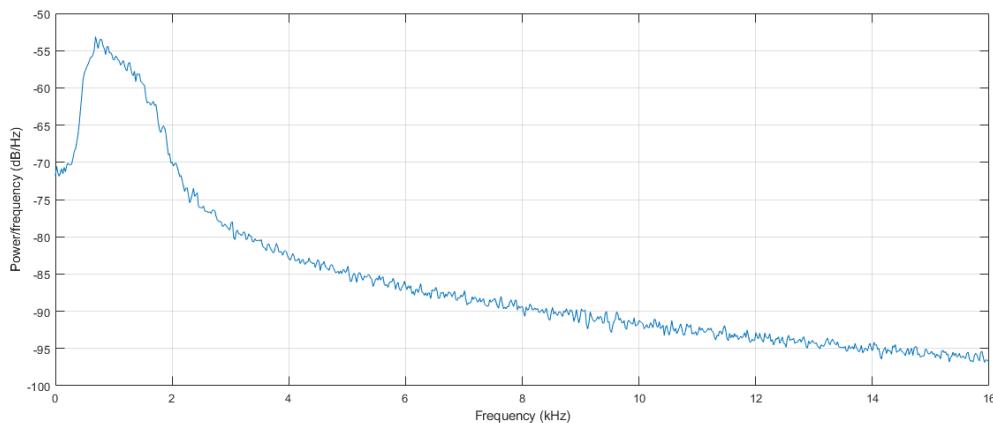


Рис. 45 Спектрограма сигналу на виході синтезатора з застосуванням атрактору Лоренца для обох блоків фазової модуляції

З рисунку 45 видно що частотний піки та бічні гармоніки, які були показані на рисунку 42, стали згладженим. Тобто дивний атрактор Лоренца може діяти як фільтр, але слід враховувати що, згідно рисунку 40, що атрактор вносить флуктуації на частоти в діапазоні 5-10 кГц. Саме ці флуктуації роблять звучання синтезатору унікальним. Комбінації різних параметрів даного синтезатора дають дуже багато варіацій звучання, що робить його досить ціним для виконавця.

## 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 4.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення власного програмного забезпечення та апаратної реалізації для синтезатора звуку з використанням атрактору Лоренца	Музична індустрія	Можливість створення звуків та мелодій з унікальним тембральним забарвленням

Таблиця 4.2. Визначення характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/ концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Запропоноване рішення	Виробники СМ			
1.	Інтеграція з усіма цифровими звуковими робочими станціями	Так	Так		+	
2.	Використання атрактору Лоренца	Так	Ні			+
3.	Модульне підключення клавіатури	Так	Так		+	
4.	Можливість змінювати прошивку в залежності від потреб	Так	Ні			+
5.	Вартість синтезатора	350 у.е.	500 у.е.		+	

### 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

У табл.4.3 наведено оцінку технологічної здійсненності ідеї проекту та наведено технології, що можуть бути використані для реалізації проекту.

Таблиця 4.3. Оцінка технологічної здійсненності ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення ПЗ	Людський ресурс	Наявна	Доступна
2		Комп'ютер	Наявна	Доступна
3		Технологія	Наявна	Доступна



### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У табл.4.4 показано попередню характеристику потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	200000 ум. од
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Складність доступу до первинних даних
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	$200000/70000=28,75\%$

У табл.4.5 показано характеристику потенційних клієнтів стартап-проекту.

Таблиця 4.5. 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	Тембральне різноманіття	Композитори (як професійні так і аматори), музичні студії	Рівень очікування якості вихідного матеріалу	Низька ціна, можливість створити унікальне звучання

У табл.4.6 проаналізовано фактори загроз реалізації стартап-проекту.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Інформаційний бар'єр	Внаслідок невдалого маркетингу клієнт може не дізнатись про продукт	Участь в міжнародних прес-конференціях та виставках, демонстрація можливостей
2	Недовіра клієнта	Втрата рангу надійного поставника	Встановлення безкоштовного ПЗ тривалістю в 1 місяць до здійснення оплати за покупку

У табл.4.7 показано фактори можливостей при реалізації стартап-проекту.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Перехід до домінування на ринку	Зростання попиту	Якісне та кількісне нарощування потужностей
2	Залучення інвесторів	Зростання попиту внаслідок зниження цін	Якісне та кількісне нарощування потужностей

У табл.4.8 визначено особливості конкурентного середовища та його вплив на впровадження проекту [36].

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Чиста конкуренція	Використання аутентичної Технології	Стандартизація на високому рівні
2. Локальний	Відсутність єдиного національного постачальника Послуг	Окремий підхід до кожної локальної ділянки
3. Міжгалузєва	Відсутня	Відсутня
4. Товарно-видова	Використання нової послуги, яка інтегрується до систем конкурентів	Принципово новий підхід до створення послуги в галузі
5. Цінова	Застосування спеціалізованих послуг, які мають незначну ціну	Можливість заощадити за допомогою застосування цієї послуги
6. Марочна	Відсутня	Відсутня

У табл.4.9 показано аналіз конкуренції проекту в галузі за допомогою «П'яти конкурентних сил М. Портера»

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Виробники синтезаторів	Виробники синтезаторів та потенційно нові виробники в галузі	Залучення ІТ-спеціалістів	Композитори та музичні студії	Надання переваги компаніям з більшим досвідом на ринку
Висновки:	Середня	Можливість виходу на ринок є	Диктують цінову політику на послугу	Клієнти диктують вимоги до якості	Обмеження існують лише у разі відмови від нової послуги

У табл.4.10 показано фактори конкурентоспроможності та їх обґрунтування.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Раціональний ціновий показник	Окупиться менше ніж за шість місяці
2	Надання сервісних послуг	Сервісна підтримка апаратної та програмної частини

У табл.4.11 наведено сильні та слабкі сторони проєкту.

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні							
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
1	Раціональний ціновий показник	19	+							
2	Надання сервісних послуг	10				+				
3	Періодична діагностика	15		+						
4	Необхідність залучення висококваліфікованих кадрів	11			+					

У табл.4.12 наведено SWOT-аналіз стартап-проєкту.

Таблиця 4.12. SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: раціональний ціновий показник, автоматизація великої кількості процесів, відсутність великої кількості обслуговуючого персоналу	Слабкі сторони: необхідність залучення інвестицій, наявність інформаційних бар'єрів для входу на ринок
Можливості: Перехід до домінування на ринку, монетизація ідеї серед інших виробників	Загрози: Незацікавленість інвесторів тавелика кількість конкурентів

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту наведені у табл.4.13.

Таблиця 4.13. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Укладення договорів з потенційними клієнтами та швидке захоплення ринку при використанні правильних бізнес-процесів	Середня	Незначні
2	Залучення інвесторів завдяки високій рентабельності проєкту	Велика	Незначні

Обрана альтернатива – залучення інвесторів завдяки високій рентабельності проєкту.

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Обґрунтування вибору цільових груп потенційних споживачів наведено у табл.4.14 [37].

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Композитори аматори	Висока	Високий	Низька	Висока
2	Композитори професіонали	Висока	Середня	Низька	Середня
3	Музичні студії	Середня	Низький	Низька	Низька

Визначення базової стратегії розвитку наведено у табл.4.15.

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Використання власної альтернативної послуги	Власна маркетингової стратегія	Зацікавлення та залучення лідерів у галузі	Стратегія фокусування
2	Дешевизна проекту	Мінімальні витрати на оплату праці, підвищення рівня прибутковості	Інтеграція з усіма системами, які використовують потенційні клієнти при вирішенні даної проблеми	Стратегія лідерства по витратах

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки наведено у табл.4.16.

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект "першопроходьцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Забирати існуючих	Ні	Наступальна стратегія

Визначення стратегії позиціонування наведено у табл.4.17.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Висока якість послуг	Стратегія фокусування	Гарантія якості	Якість, надійність
2	Мінімальні витрати	Стратегія лідерства по витратах	Універсальність запропонованого рішення	Дешевизна, універсальність

#### 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Ключові переваги концепції потенційного товару наведено у табл.4.18.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Якість	Висока якість, надійність	Надійність
2	Дешевизна	Пришвидшення процесу, раціональне використання коштів, яке сприяє збільшенню прибутку	Інноваційність

Визначено три рівні моделі товару. Сутність та складові рівнів товару наведено у табл.4.19.

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Якісні послуги, стандартизована якість послуг та обладнання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1) Вартість обслуговування	1) М	1) Е
	2) Кількість комплексів обладнання	2) Нм	2) Тл
	3) Строк безвідмовної праці	3) М	3) Е
	4) Технологічна собівартість	4) М	4) Тх
	Якість: постійне оновлення ПЗ		
Доставка: встановлення та налаштування			
Марка: відсутня			
III. Товар із підкріпленням	До продажу – встановлення ПЗ		
	Після продажу – сервісна підтримка		

За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: завдяки ліцензуванню . Визначення меж встановлення ціни на послугу наведено у табл.4.20.

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на продукти-замінники	Рівень цін на продукти - аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
1	700 у.о./од.	Відсутні	Високий	Н.400 у.о – В.1500 у.о (Товар)

Формування системи збуту послуги наведено у табл.4.21.

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка купівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконати постачальник послуг	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Орієнтована на автоматизацію та збільшення кількості реєстрації порушень	Постачання якісних послуг	Значна	Договірна система збуту

Концепції маркетингових комунікацій наведено у табл.4.22.

Таблиця 4.22. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Зацікавленість в якісному та точному продукті з раціональним використанням коштів	Лейбли, організатори виступів, промоутери	Висока рентабельність ідеї	Зацікавити у покращеннях пов'язаних із зростаючою популярністю послуг	Представлення безкоштовної демо-версії на 30 діб
2	Зацікавленість у великій кількості послуг із дотриманням умов якості	Лейбли, організатори виступів, промоутери	Глибина каналу постачальників гарант якості	Зацікавити у позитивних сторонах первісності та в глибині каналу постачання	Представлення ПЗ для систем ідентифікації при моніторингу шуму

## ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації виконано дослідження методів синтезу музичних сигналів та розроблено програмно-апаратну реалізацію синтезатора звуку на основі мікроконтролера Axoloti Core. В результаті виконання магістерської дисертації отримано такі результати:

1. Досліджено основні способи синтезу звуку та їх алгоритми. Проаналізовано допоміжні засоби модифікації синтезованого звуку, а саме, вплив генераторів обвідних, ефектів. Показано можливість застосування осциляторів низьких частот.
2. Детально досліджено способи реалізації алгоритмів синтезу звуку на мікроконтролері Axoloti Core. Проаналізовано спектрограми сигналів записаних з аудіовиходу мікроконтролера при використанні розглянутих алгоритмів. Виявлені переваги та недоліки використання розглянутих алгоритмів синтезу звуку на даній платформі.
3. Розроблено програмно-апаратну реалізацію синтезатора звуку на основі мікроконтролера Axoloti Core, з використанням алгоритмів синтезу за допомогою фазової модуляції та адитивного синтезу.
4. Досліджено та реалізовано програмне рішення використання атрактору Лоренца для можливості частотної модуляції сигналу синтезатора. Показано, що це рішення використовується для надання унікальності звучання розробленого синтезатора.
5. Детально досліджено вплив атрактору Лоренца на спектральні характеристики сигналу записаного з виходу тракту обробки. Показано, що використання атрактору Лоренца згладжує бічні гармоніки та вносить флуктуації на частоти в діапазоні 5-10 кГц.

## ПОСИЛАННЯ

1. J. Cage, “Experimental music”, *Silence: Lectures and Writings*, 1961
2. Nicholls D. *Avant-garde and experimental music // The Cambridge History of American Music*.— Cambridge University Press, 1998.— pp. 517—534.
3. C. Fernqvist, “Creativity and resistance in experimental music performance practices: Re-evaluating the interaction of performer, instrument and score”, PhD thesis, University of York, 2020.
4. J. A. Moorer, “Signal Processing Aspects of Computer Music: A Survey”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, No. 8, pp. 1108-1137, August 1977.
5. Юкио Сато, “Без паники! Цифровая обработка сигналов”, *Додека-XXI*, С. 76, 2010.
6. A. Horner and L. Ayers, “Modeling Acoustic Wind Instruments with Contiguous Group Synthesis”, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 46, No.10, pp. 868-879, October 1998.
7. C. Roads, *The Computer Music Tutorial*, MIT Press, 1996
8. V. Välimäki, “Discrete-Time Synthesis of the Sawtooth Waveform With Reduced Aliasing”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 12, No. 3, pp. 214-217, March 2005.
9. Winckel, Fritz “Music, Sound and Sensation: A Modern Exposition”, p. 134. *Courier*. 1967
10. R.A. Moog, “A Voltage-Controlled Low-Pass High-Pass Filter For Audio Signal Processing”, Presented at the AES 17<sup>th</sup> Annual Meeting, Preprint 413, October 1965.
11. Hewlett-Packard, *Amplitude and Frequency Modulation*, Application Note 150-1 (HP publication number 5954-9130), 1996
12. J. Chowning, “The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation”, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 21, No.7, pp. 526-534, September 1973.



13. J.-P. Palamin, P. Palamin and A. Ronveaux, "A Method of Generating and Controlling Musical Asymmetrical Spectra", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 36, No.9, pp. 671-685, September 1988.
14. Tan et al., "Real-Time Implementation of Double Frequency Modulation (DFM) Synthesis", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 42, No.11, pp. 918-926, November 1994.
15. B. Schottstaedt, "The Simulation of Natural Instrument Tones Using Frequency Modulation with a Complex modulating Wave", *Computer Music J.*, vol. 1, No.4, pp. 46-50, 1977.
16. D. Arfib, "Digital Synthesis of Complex Spectra by Means of Multiplication of Nonlinear Distorted Sine Waves", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 27, No.10, pp. 757- 768, October 1979.
17. M. LeBrun, "Digital Waveshaping Synthesis", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 27, No.4, pp. 250-266, April 1979.
18. J. Beauchamp, "Brass Tone Synthesis by Spectrum Evolution Matching with Nonlinear Functions", *Computer Music J.*, vol. 3, No.2, pp. 35-43, 1979.
19. C. Dodge and T.A. Jerse, *Computer Music: Synthesis, Composition and Performance*, 1<sup>st</sup> Edition, Schirmer Books, New York, 1985
20. B. Lang, "Waveform Synthesis using Bezier Curves with Control Point Modulation", AES Convention Paper 6044, Presented at the 116<sup>th</sup> AES Convention, 2004 May 8-11, Berlin, Germany.
21. Интернет ресурс: "Wolfram Research, Bézier Curve, Mathworld", URL: <https://mathworld.wolfram.com/BezierCurve.html>
22. K. Karplus and A. Strong, "Digital Synthesis of Plucked-String and Drum Timbres", *Computer Music J.*, vol. 7, No.2, pp. 43-55, 1983
23. D. Jaffe and J. Smith, "Extensions of the Karplus-Strong Plucked String Algorithm", *Computer Music J.*, vol. 7, No.2, pp. 56-69, 1983

24. C. Sullivan, “Extending the Karplus-Strong Algorithm to Synthesize Electric Guitar Timbres with Distortion and Feedback”, *Computer Music J.*, vol. 14, No.3, pp. 26-37, 1990
25. T. Tolonen, V. Välimäki and M. Karjalainen, *Evaluation of Modern Sound Synthesis Methods*, Report 48, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki University of Technology, 1998.
26. T. Mathew , B. M. Abraham, R. Scari. “Music Synthesis using Sinusoid Generator, ADSR Envelope Generator and Composer Code”, *International Journal of Scientific Engineering and Research*, Volume 3 Issue 2, February 2015.
27. *Downloadable Sounds Level 1 Specification*, Midi Manufacturers Association, version 1.1b, September 2004
28. Интернет ресурс: “[www.axoloti.com](http://www.axoloti.com)”, URL: <http://www.axoloti.com/product/axoloti-core/>
29. Сергієнко А. Б. *Цифрова обробка сигналів: навч. посібник 3-тє видання* // СПб.: БХВ-Петербург, 2011.
30. P. A. Esquif, M. Karjalainen V. Välimäki “Frequency-Zooming ARMA Modeling for Analysis of Noisy String Instrument Tones” *EURASIP Journal on Applied Signal Processing* 2003: vol. 10, pp. 953–967
31. Интернет ресурс: “[www.axoloti.com](http://www.axoloti.com)”, URL: <http://community.axoloti.com/t/usb-midi-controllers/19>
32. Rubinfeld L. A., Siegman W. L. Nonlinear dynamic theory for a double-diffusive convection model // *SIAM J. Appl. Math.* vol. 32. pp. 871. 1977
33. M. Tabor, J. Weiss, “Analytic structure of the Lorenz system” - *Physical Review A*, 1981
34. Kuznetsov, N.V. Mokaev, T.N. Kuznetsova, O.A. Kudryashova, E.V. (2020). “The Lorenz system: hidden boundary of practical stability and the Lyapunov dimension”. *Nonlinear Dynamics*. DOI:10.1007/s11071-020-05856-4.

35. Leonov, G.A. Kuznetsov, N.V. Korzhemanova, N.A. Kusakin, D.V. (2016). “Lyapunov dimension formula for the global attractor of the Lorenz system”. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 41: 84—103
36. THE SOCIETY OF MOTION PICTURE AND TELEVISION ENGINEERS – SMPTE Monthly Education Webcast: UHD in a Hybrid SDI/IP World. Нью-Йорк, США, 2015 с.10 URL: <https://www.smpte.org/sites/default/files/2013-09-10-3GSDI-Hudson-V3-Handout.pdf>
37. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – К: НТУУ "КПІ", 2016. – 28 с.

## ДОДАТОК А

Реферат англійською мовою за темою магістерської дисертації

### ABSTRACT

Development and implementation of sound synthesizer software and hardware

Master's thesis: 93 pages, 23 tables, 45 figures, 1 appendix, 37 sources.

Actuality of theme:

The development of musical genres over the past 20 years has contributed to the spreading of experimental music [1]. As in the case of the "musical avant-garde", the term "experimental music" is often used to describe radical composers and their works [2]. Some musicologists draw a line between avant-garde and experimental music in terms of their relationship to the Eurocentric musical tradition. According to them, in the most general form, avant-garde music occupies extreme positions within the tradition, while experimental music situated outside of it [2].

The term "experimental music" is used in music criticism to describe samp

of new music, the aesthetics of which clearly violates existing traditional norms and rules in the art of music. Experimental music is characterized by the use of dissonances, noise [1] and the element of performance [3]: when the sound evokes short and intense emotions. Experimental music is more chaotic than other electronic music. Nowadays, elements of experimental music and performance are borrowed from more popular music genres. So there is a need to create an instrument that will be designed for experimental music and will create the appropriate sound.

The aim of the research is to develop a software and hardware implementation of a sound synthesizer based on the Axoloti Core microcontroller, which will create a unique timbre sound content.

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks:

Investigate the main methods of sound synthesis and their algorithms. Investigate auxiliary means of modification of the synthesized sound;

Investigate ways to implement sound synthesis algorithms on the Axoloti Core microcontroller. Choose the most effective methods of sound synthesis to solve the problem.

To develop a software and hardware implementation of a sound synthesizer based on the Axoloti Core microcontroller, using the studied synthesis algorithms.

Develop solutions to make the sound of the developed synthesizer unique.

Object of research: Sound synthesis systems.

Subject of research: Software and hardware sound synthesizer.

Research methods: Theoretical review of the main methods of sound synthesis and their algorithms. Software implementation of sound synthesis algorithms on the Axoloti Core microcontroller. Analysis of the spectral characteristics of the signals recorded from the audio output of the microcontroller using the considered algorithms. Identifying the advantages and disadvantages of using the considered algorithms for sound synthesis on this platform. Using the Lorentz attractor for the possibility of frequency modulation to create a unique sound of the developed synthesizer. Analysis of the influence of the Lorentz attractor on the spectral characteristics of the signal.

The practical significance of the obtained results is to create a prototype of a sound synthesizer based on the Axoloti Core microcontroller, using a Lorentz attractor, which will create a unique timbre sound content.

Keywords: SOUND SYNTHESIS, SYNTHESIZER, LORENZA ATTRACTOR, MICROCONTROLLER