

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ ТА ОБРОБКИ АУДІОСИГНАЛІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація Запропоновано математичні методи для оптимізації генерації та фільтрації звуку у віртуальному синтезаторі. Описано використання алгоритмів з обмеженою смугою пропускання для усунення аліасингу, а також математичні перетворення у цифрових фільтрах та огинаючих.

Ключові слова: DSP, BLIT, аліасинг, ADSR, State Variable Filter, частота Найквіста.

Abstract *Mathematical methods for optimizing sound generation and filtering in a virtual synthesizer are proposed. The use of band-limited algorithms to eliminate aliasing, as well as mathematical transformations in digital filters and envelopes, is described.*

Keywords: DSP, BLIT, aliasing, ADSR, State Variable Filter, Nyquist frequency.

Вступ

При проектуванні систем цифрової обробки сигналів (DSP) фундаментальною проблемою є спектральний аліасинг, який виникає при спробі генерувати різкі геометричні хвилі. Згідно з теоремою Котельникова-Шеннона, система не здатна відтворювати частоти, що перевищують половину частоти дискретизації (ліміт Найквіста), без виникнення негармонійних спотворень [3]. Метою даної роботи є імплементація прецизійних математичних алгоритмів для генерації та фільтрації аудіосигналу з дотриманням спектральної чистоти.

Результати дослідження

Для генерації хвиль застосовано алгоритм з обмеженою смугою пропускання BLIT (*Band-Limited Impulse Train*), який математично обмежує формування гармонік вище ліміту Найквіста, запобігаючи цифровому віддзеркаленню частот [1]. Результат роботи алгоритму та відсутність цифрового аліасингу візуалізовано на рис. 1.

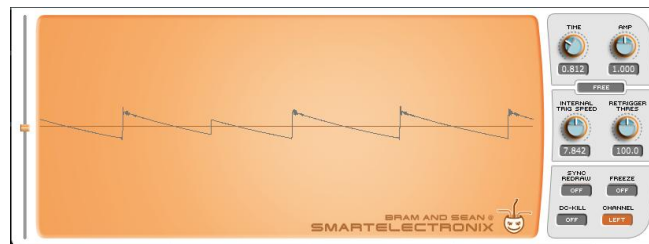


Рис. 1. Візуальний аналіз спектральної чистоти згенерованої хвилі

Розрахунок динаміки звуку забезпечується амплітудною огинаючою ADSR. Значення огинаючої на кожному кроці дискретизації обчислюється за швидкою рекурсивною формулою [4]:

$$L_n = M * (L_{(n-1)} - T) + T$$

де L — поточний рівень амплітуди, T — цільове значення фази, а M — коефіцієнт експоненціального затухання.

За тембральне забарвлення відповідає модуль цифрової фільтрації на базі *State Variable Filter* за методом Ендрю Сімпера [2]. Цей алгоритм гарантує математичну стабільність при швидкій частотній модуляції. Для імітації нелінійної поведінки аналогових приладів лінійні значення резонансу експоненціально трансформуються в добротність (Q -фактор). Крім того, для запобігання кліппінгу

алгоритм автоматично обчислює компенсацію підсилення (**V_trim**), що знижує рівень вихідного сигналу при критично високому резонансі:

$$V_{trim} = A * (B - O_{mix} - C * N_{mix}) * (D - E * R)$$

де O — рівень змішування осциляторів, N — рівень шуму, а R — значення резонансу.

Висновки

Впровадження алгоритму BLIT та математичної апроксимації State Variable Filter забезпечує високу акустичну якість генерації аудіосигналу. Використання експоненціальних перетворень для розрахунку параметрів ADSR гарантує природне затухання звуку та оптимізацію використання центрального процесора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Stilson T. Alias-Free Digital Synthesis of Classic Analog Waveforms. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://ccrma.stanford.edu/~stilti/papers/> (дата звернення: 17.03.2026).
2. Simper A. Cytomic Technical Papers: The SVF Linear Trapezoidal Integrated Method [Електронний ресурс] / A. Simper. — Cytomic, 2014. — Режим доступу: <https://cytomic.com/files/dsp/SvfLinearTrapezoidalSimplified.pdf> (дата звернення: 17.03.2026).
3. Lazzarini V. Digital Synthesis of Sound: Theory and Practice / V. Lazzarini. — Cambridge : Cambridge University Press, 2021. — 350 p.
4. Hollemans M. Code Your Own Synth Plug-Ins With C++ and JUCE. — Leanpub, 2022.

Сентюрін Євгеній Євгенійович— студент групи 2ПІ-22б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця,
E-mail: yevhenii_sentiurin@ukr.net

Sentiurin Yevhenii Yevheniovich— student of group 2PI-22b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia,
E-mail: yevhenii_sentiurin@ukr.net