

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-64-35>

УДК 621.391

Харчук Каріна Миколаївна, студентка бакалаврату

<https://orcid.org/0009-0008-2307-8077>

Губар Вячеслав Григорович, старший викладач

<https://orcid.org/0000-0001-9440-0109>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО ТЮНЕРА-КАМЕРТОНА

Харчук К. М., Губар В. Г. Дослідження та вирішення проблеми багатофункціонального цифрового тюнера-камертона. У статті розглянуто дослідження портативного багатофункціонального цифрового тюнера-камертона для музичного навчання, який у межах єдиного приладу поєднує сім автономних функцій: синтез еталонних тонів, цифровий тюнер, розпізнавання акордів, арпеджіатор, вокальні розспівки, диктофон та семплер. Розкрито проблему відсутності єдиного доступного рішення, здатного одночасно забезпечувати синтез еталонних тонів, налаштування інструментів, розпізнавання акордів, виконання вокальних вправ та звукозапис. Запропоновано розподілену апаратну архітектуру з розділенням обчислювального навантаження: цифровий синтез і обробку сигналів покладено на мікроконтролер STM32 із модулем обчислень з рухомою комою, а бездротову трансляцію аудіо за профілем Bluetooth A2DP реалізовано через ESP32. Описано реалізацію адитивного синтезу звуку з апаратним виведенням через інтерфейс I2S та подвійною буферизацією на базі DMA, а також алгоритми визначення висоти тону методом автокореляції з параболічною інтерполяцією та розпізнавання акордів алгоритмом Герцеля. Експериментальна перевірка прототипу підтвердила, що похибка визначення та відтворення висоти тону не перевищує $\pm 1,5$ цента, правильність розпізнавання тризвуків перевищує 90 %. Доведено працездатність усіх семи режимів роботи приладу.

Ключові слова: цифровий тюнер, камертон, STM32, ESP32, адитивний синтез, цифрова обробка сигналів, розпізнавання акордів, автокореляція, алгоритм Герцеля, Bluetooth A2DP

Kharchuk K., Gubar V. Research and solution of the problem of a multifunctional digital tuning fork tuner microcontroller. The article discusses the study of a portable multifunctional digital tuner-tuning fork for music education, which combines seven autonomous functions within a single device: synthesis of reference tones, digital tuner, chord recognition, arpeggiator, vocal chants, dictaphone, and sampler. The problem of the absence of a unified affordable solution capable of simultaneously providing reference-tone synthesis, instrument tuning, chord recognition, vocal exercises and audio recording is examined. A distributed hardware architecture with separation of the computational load is proposed: digital synthesis and signal processing are handled by the STM32 microcontroller with a floating-point unit, while wireless audio streaming over the Bluetooth A2DP profile is implemented through an ESP32 module. The implementation of additive sound synthesis with hardware output via the I2S interface and DMA-based double buffering is described, together with pitch-detection algorithms using autocorrelation with parabolic interpolation and chord recognition based on the Goertzel algorithm. Experimental verification of the prototype confirmed that the pitch error does not exceed ± 1.5 cents, the recognition accuracy of triads exceeds 90%. The operability of all seven modes of the device has been proven.

Keywords: digital tuner, tuning fork, STM32, ESP32, additive synthesis, digital signal processing, chord recognition, autocorrelation, Goertzel algorithm, Bluetooth A2DP.

Постановка наукової проблеми. Музична освіта, вокальна підготовка та самостійне опанування інструментів вимагають одночасного використання кількох приладів: камертона або тюнера для контролю висоти звуку, джерела еталонних тонів, засобу розпізнавання акордів та пристрою для запису власного виконання. На практиці користувач-початківець змушений застосовувати паралельно декілька вузькоспеціалізованих пристроїв, кожен з яких розв'язує лише одну задачу, що підвищує сумарну вартість та знижує ефективність навчання.

Класичний механічний камертон [1] відтворює лише один еталонний тон (найчастіше 440 Гц) і потребує розвинутого музичного слуху. Бюджетні цифрові тюнери мають обмежений функціонал, низьку точність в умовах зовнішнього шуму та часто залежать від фізичного контакту з інструментом. Семплери й синтезатори не поєднують функцій аналізу звуку, а портативні рекордери позбавлені можливостей синтезу. Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача створення єдиного компактного приладу, який поєднує синтез, аналіз і запис звуку з цифровою обробкою сигналів у реальному часі за умови портативності та низької собівартості.

Аналіз актуальних досліджень і публікацій. Для оцінки наявних рішень розглянуто найпоширеніші прилади ринку: механічний камертон [1], цифровий тюнер Deviser JT-03 [2], семплер Teenage Engineering PO-33 K.O. [3], аналоговий синтезатор Korg Monotron Duo [4] та портативний рекордер Zoom H1n [5]. Камертон простий і компактний, проте виконує єдину

функцію. Тюнер Deviser JT-03 забезпечує візуальну індикацію відхилення, але має обмежену точність у шумі та живлення від елемента CR2032, напруга якого просідає під навантаженням.

Семплер PO-33 К.О. (рис.1) дозволяє записувати й обробляти семпли, однак не має бездротового інтерфейсу та обмежений приблизно 40 секундами аудіо.



Рис. 1. PO-33 К.О.

Синтезатор Korg Monotron Duo (рис. 2) на аналогових осциляторах вирізняється високим рівнем власних шумів і низькою точністю позиціонування на стрічковому контролері.



Рис. 2. Korg Monotron Duo

Рекордер Zoom H1n (рис. 3) забезпечує якісний запис, проте повністю позбавлений функцій синтезу та аналізу звуку.



Рис. 3. Zoom H1essential

Патентний аналіз підтверджує переважання вузькоспеціалізованих рішень. Патент [6] описує цифровий тюнер на мікроконтролері без функцій синтезу або розпізнавання акордів. Патент [7] поєднує тюнер і рекордер, але обмежений пасивним аналізом без генерації звуку. Патент [8] присвячений автоматичному розпізнаванню акордів за спектральним аналізом, проте є виключно детектором без синтезу та запису.

Незважаючи на різноманітність наявних рішень, залишається невирішеною задача поєднання синтезу, аналізу та запису звуку в одному портативному пристрої, що й визначає напрям цієї роботи. Метою дослідження є моделювання та експериментальна перевірка портативного

багатофункціонального цифрового тюнера-камертона, що в межах єдиної платформи забезпечує сім режимів роботи: синтез еталонних тонів із вибором тембру, тюнер із відображенням відхилення, розпізнавання акордів у реальному часі, арпеджіатор, відтворення вокальних вправ із автоматичним транспонуванням, диктофон та семплер.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Апаратна архітектура. Узагальнення недоліків наявних приладів дозволило сформувати ключові вимоги до архітектури. Відсутність бездротового зв'язку у PO-33 К.О. обумовила інтеграцію Bluetooth-модуля; аналоговий шум Korg Monotron Duo визначив вибір на користь повністю цифрового синтезу; обмежений обсяг пам'яті семплера та залежність тюнера від фізичного контакту з інструментом зумовили використання microSD-карти й мікрофонного модуля з автоматичним регулюванням підсилення.

Важливою особливістю є розподіл обчислювальної потужності. Основну логіку, алгоритми цифрового синтезу й обробки сигналів покладено на мікроконтролер STM32 (ядро Cortex-M4F з апаратним модулем обчислень з рухомою комою та DSP-інструкціями) [9], а функцію бездротової трансляції аудіо за профілем A2DP — на модуль ESP32 [10]. Зв'язок між ними реалізовано за допомогою цифрового інтерфейсу I2S. Аудіотракт побудовано на мікрофонному підсилювачі MAX9814 з автоматичним регулюванням підсилення та аудіокодеку CS43L22; введення команд здійснюється 16-кнопковою сенсорною ємнісною клавіатурою TTP229, що, на відміну від механічних і мембранних рішень, не має рухомих частин і гарантує високу віброміцність. Дані зберігаються на microSD-карті по інтерфейсу SPI у файловій системі FatFs.

Програмне забезпечення розроблено в середовищі STM32CubeIDE з використанням бібліотеки HAL і стандарту CMSIS. Програму побудовано за принципом кооперативного суперциклу: у головному циклі послідовно викликаються невеликі неблокуючі задачі (формування звуку, опитування клавіатури та джойстика, обслуговування мікрофона, арпеджіатор, запис і відтворення), а найбільш критична за часом задача формування звуку додатково викликається всередині тривалих операцій виведення на дисплей, що гарантує відсутність розривів звукового потоку.

В основі формування еталонних тонів лежить адитивний (Фур'є) синтез: періодичну форму хвилі подають як суму гармонік, частоти яких кратні основній частоті тону. Миттєве значення звукового відліку обчислюється за формулою (1):

$$x[n] = A \cdot g[n] \cdot \sum_{k=1 \dots N} c_k \cdot \sin(k \cdot \varphi[n]), \quad (1)$$

де $x[n]$ — значення n -го відліку; A — амплітуда; $g[n]$ — коефіцієнт обвідної гучності ($0 \dots 1$); c_k — нормований коефіцієнт k -ї гармоніки; N — кількість гармонік ($N = 8$); $\varphi[n]$ — поточна фаза основного тону. Фаза накопичується покроково за формулою (2):

$$\varphi[n] = \varphi[n-1] + 2\pi \cdot f / f_s, \quad (2)$$

де f — частота ноти, Гц; f_s — частота дискретизації (44 100 Гц). Тембр визначається набором коефіцієнтів гармонік; передбачено п'ять конфігурацій: чиста синусоїда (SINE), прямокутний (SQR), пилкоподібний (SAW), кларнет (CLAR) та орган (ORGN). Коефіцієнти нормовано так, щоб їхня сума дорівнювала одиниці, що запобігає втраті даних (табл. 1).

Таблиця 1. Коефіцієнти гармонік звукових конфігурацій

Тембр	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
SINE	1	0	0	0	0	0	0	0
SQR	0,597	0	0,199	0	0,119	0	0,085	0
SAW	0,368	0,184	0,123	0,092	0,074	0,061	0,053	0,046
CLAR	0,5	0,05	0,35	0,05	0,03	0,01	0,005	0,005
ORGN	0,35	0,2	0,18	0,15	0,07	0,03	0,015	0,005

Для усунення клацань на початку ноти застосовано лінійну обвідну атаки: коефіцієнт $g[n]$ лінійно зростає від 0 до 1 протягом близько 50 мс. Сформовані відліки записуються у кільцевий буфер розміром 32 КБ, поділений на дві половини (подвійна буферизація, ring-pong), вміст якого DMA-контролер безперервно й без участі процесора виводить на інтерфейс I2S. Після завершення

передавання кожної половини апаратно генерується переривання, у відповідь на яке програма дозаповнює звільнену половину новими відліками.

Виведення звуку. Заповнений буфер виводиться через I2S у режимі ведучого передавача за стандартом Philips I2S (16 біт, 44,1 кГц) на аудіокодек CS43L22, що виконує цифро-аналогове перетворення для дротових навушників. Паралельно той самий потік заведено на ESP32, який ретранслює звук на бездротові навушники за профілем A2DP [10]. Дротовий канал має практично нульову затримку і є основним, тоді як бездротовий додає затримку 0,1–0,2 с через буферизацію у профілі A2DP.

Для розуміння логіки роботи пристрою в режимах аналізу звукового потоку було розроблено загальну структуру проходження та обробки сигналів. Процес збору даних, цифрової фільтрації та спектрального аналізу на базі мікроконтролера STM32 схематично зображено на рис. 4.

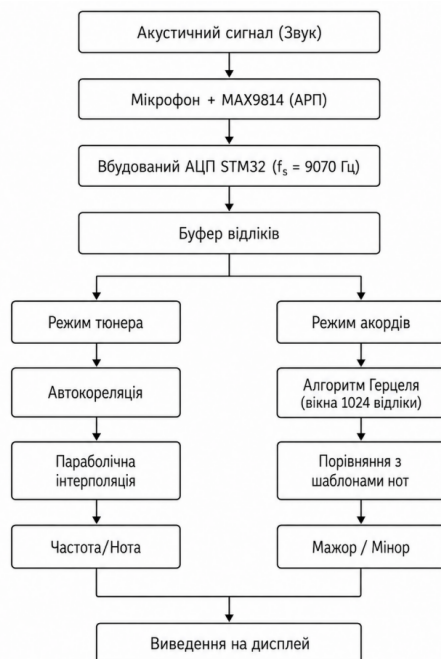


Рис. 4. Структурна схема процесів цифрової обробки сигналів пристрою

Як показано на структурній схемі, сигнал з мікрофона оцифровується з частотою 9070 Гц. У режимі тюнера основна частота визначається методом автокореляції з параболічною інтерполяцією поблизу максимуму автокореляційної функції, що зменшує похибку з десятків центів до часток centa у верхній частині робочого діапазону (приблизно 30–650 Гц). У режимі розпізнавання акордів ті самі відліки аналізуються алгоритмом Герцеля у вікнах по 1024 відліки; виявлений набір нот порівнюється з мажорним {0, 4, 7} та мінорним {0, 3, 7} шаблонами, а рішення підтверджується протягом близько 0,5 с для уникнення хибних спрацювань.

Результати експериментальних досліджень. У режимі тюнера на вхід подавалися еталонні тони, а результат порівнювався з показаннями програми GuitarTuna [11] (табл. 2).

Таблиця 2. Результати дослідження точності тюнера

Нота	$f_{\text{ет}}$, Гц	$f_{\text{вим}}$, Гц	Похибка, цент
E2	82,41	82,38	–0,6
A2	110	110,05	0,8
D3	146,83	146,76	–0,8
G3	196	196,12	1,1
B3	246,94	246,8	–1,0
E4	329,63	329,8	0,9
A4	440	440	0
C5	523,25	523,55	1
D5	587,33	587	–1,0

У всьому досліджуваному діапазоні похибка визначення частоти не перевищує $\pm 1,5$ цента. Цент — це одна сота частина музичного півтону. Відхилення в центах показує помилку налаштування: плюс означає, що звук завищений, а мінус — занижений. Людина помічає фальш лише при відхиленні понад ± 5 центів, тому похибка приладу в $\pm 1,5$ цента є невідчутною для вуха.

У режимі розпізнавання акордів перевірили 7 основних тонів (A–G) у мажорному та мінорному ладах — усього 14 акордів (табл. 3).

Таблиця 3. Результати розпізнавання акордів

Акорд	Склад (ноти)	Розпізнано	Точність, %
C (До-мажор)	C–E–G	C	100
Am (Ля-мінор)	A–C–E	Am	100
G (Соль-мажор)	G–B–D	G	95
F (Фа-мажор)	F–A–C	F	90
Dm (Ре-мінор)	D–F–A	Dm	95
Em (Мі-мінор)	E–G–B	Em	95
E (Мі-мажор)	E–G#–B	E	90
A (Ля-мажор)	A–C#–E	A	90

У середньому правильність розпізнавання тризвуків перевищує 90%; найкраще розпізнавалися акорди з чітко вираженим основним тоном у середньому регістрі. Режими арпеджіатора та розспівів відтворювали задані послідовності нот із витриманими часовими інтервалами та правильним складом акордів. Функції диктофона й семплера, що зберігають дані на microSD у файлової системі FatFs, працювали надійно: записані фрагменти коректно зберігалися та відтворювалися без втрати даних.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Запропоновано та експериментально досліджено портативний багатофункціональний цифровий тюнер-камертон на базі мікроконтролера STM32, який у межах єдиного компактного приладу поєднує сім режимів роботи: синтез еталонних тонів, тюнер, розпізнавання акордів, арпеджіатор, розспівки, диктофон та семплер. Запропонована розподілена архітектура з винесенням бездротового каналу на ESP32 та повністю цифровим синтезом усуває основні недоліки наявних вузькоспеціалізованих рішень.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні розподіленої двопроцесорної архітектури портативного навчального музичного приладу, що поєднує синтез, аналіз і запис звуку в реальному часі з бездротовою трансляцією за профілем A2DP. Експериментальна перевірка підтвердила працездатність усіх режимів: похибка визначення та відтворення висоти тону не перевищує $\pm 1,5$ цента, правильність розпізнавання тризвуків перевищує 90%.

Перспективи подальших досліджень спрямовані на інтеграцію технологій штучного інтелекту та машинного навчання безпосередньо на пристрої в межах концепції Edge AI [12], що дозволить перейти від класичних детермінованих алгоритмів цифрової обробки сигналів до адаптивних інтелектуальних систем. Основним напрямом розвитку проєкту є впровадження легковагових згорткових або рекурентних нейронних мереж для інтелектуального розпізнавання складних поліфонічних структур, таких як септакорди, нонакорди або акорди із затриманням та зміненням басовим тоном. Для реалізації цього підходу звуковий сигнал спочатку перетворюватиметься на цифровий спектр частот, зокрема за допомогою обчислення звукових ознак — коефіцієнтів MFCC або хроматограм. Це дозволить нейромережі аналізувати не «сирій» аудіопотік, а вже підготовлені ознаки звуку, що має підвищити точність розпізнавання нот. Оскільки обчислювальні ресурси мікроконтролера STM32 обмежені, навчання нейромережевих моделей здійснюватиметься на зовнішньому сервері у середовищі TensorFlow [13], після чого готова модель піддаватиметься процедурі квантування до 8-бітних цілих чисел для стиснення та імпортуватиметься в мікроконтролер за допомогою спеціалізованого фреймворку TensorFlow Lite for Microcontrollers [13] або бібліотеки X-CUBE-AI від STMicroelectronics [14] із використанням апаратних DSP-інструкцій та CMSIS-NN. З метою раціонального розподілу апаратних ресурсів пропонується використовувати гібридну архітектуру обчислень, де базовий аналіз виконуватиметься локально на ядрі Cortex-M4, а ресурсомісткі завдання глибинного аналізу спектра та візуалізації результатів переноситимуться на супутній мобільний додаток смартфона через бездротовий канал зв'язку модуля ESP32.

Список бібліографічного опису

1. Камертон. URL: <https://knyh.istoriya.v.ua/ukraincyam/shho-take-kamerton-ta-yak-vin-pracyuie.html> (дата звернення: 21.06.2026).
2. Teenage Engineering PO-33 K.O. URL: https://teenage.engineering/guides/po-33/en?srsId=AU7gw4XNduQSuT9J3_1B3csDIN8EBZntRHNtLlwflLszd9LFmCw2u6Zj7 (дата звернення: 21.06.2026).
3. Синтезатор Korg Monotron Duo. URL: <https://www.soundonsound.com/reviews/korg-monotron-delay-duo> (дата звернення: 21.06.2026).
4. Диктофон Zoom H1essential. URL: <https://www.musicradar.com/music-tech/recording/a-clear-winner-on-portability-and-ease-of-use-and-offers-fantastic-value-zoom-h1-essential-review> (дата звернення: 21.06.2026).
5. Musical instrument tuner : pat. US7285710B1. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/US7285710B1/en> (дата звернення: 21.06.2026).
6. Multifunctional wearable audio-sensing electronic device : pat. US9500515B2. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/US9500515B2/en> (дата звернення: 21.06.2026).
7. Chord detection apparatus, chord detection method, and program therefor : pat. US8492636B2. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/US8492636B2/en> (дата звернення: 21.06.2026).
8. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (дата звернення: 21.06.2026).
9. Schatzmann P. ESP32-A2DP: A2DP Bluetooth audio library for ESP32. GitHub. URL: <https://github.com/pschatzmann/ESP32-A2DP> (дата звернення: 21.06.2026).
10. Staudacher, M., Steixner, V., Griessner, A. та ін. Швидке визначення основної частоти за допомогою адаптивної автокореляції. J AUDIO SPEECH MUSIC PROC. 2016, 17 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13636-016-0095-8> (дата звернення: 21.06.2026).
11. Sysel, P., Rajmic, P. Узагальнення алгоритму Герцеля для випадків, коли частота не є цілим кратним основної частоти. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2012, 56 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2012-56> (дата звернення: 21.06.2026).
12. Edge AI. Ultralytics. URL: <https://www.ultralytics.com/glossary/edge-ai> (дата звернення: 21.06.2026).
13. TensorFlow. URL: <https://www.tensorflow.org/> (дата звернення: 21.06.2026).
14. X-CUBE-AI. STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-ai.html> (дата звернення: 21.06.2026).

References

1. Tuning fork. URL: <https://knyh.istoriya.v.ua/ukraincyam/shho-take-kamerton-ta-yak-vin-pracyuie.html> (accessed: 21.06.2026).
2. Teenage Engineering PO-33 K.O. URL: https://teenage.engineering/guides/po-33/en?srsId=AU7gw4XNduQSuT9J3_1B3csDIN8EBZntRHNtLlwflLszd9LFmCw2u6Zj7 (accessed: 21.06.2026).
3. Synthesizer Korg Monotron Duo. URL: <https://www.soundonsound.com/reviews/korg-monotron-delay-duo> (accessed: 21.06.2026).
4. Voice recorder Zoom H1essential. URL: <https://www.musicradar.com/music-tech/recording/a-clear-winner-on-portability-and-ease-of-use-and-offers-fantastic-value-zoom-h1-essential-review> (accessed: 21.06.2026).
5. Musical instrument tuner : pat. US7285710B1. URL: <https://patents.google.com/patent/US7285710B1/en> (accessed: 21.06.2026).
6. Multifunctional wearable audio-sensing electronic device : pat. US9500515B2. URL: <https://patents.google.com/patent/US9500515B2/en> (accessed: 21.06.2026).
7. Chord detection apparatus, chord detection method, and program therefor : pat. US8492636B2. URL: <https://patents.google.com/patent/US8492636> (accessed: 21.06.2026).
8. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (accessed: 21.06.2026).
9. Schatzmann P. ESP32-A2DP: A2DP Bluetooth audio library for ESP32 : GitHub. URL: <https://github.com/pschatzmann/ESP32-A2DP> (accessed: 21.06.2026).
10. Staudacher, M., Steixner, V., Griessner, A. et al. Fast fundamental frequency determination via adaptive autocorrelation. J AUDIO SPEECH MUSIC PROC. 2016, 17 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13636-016-0095-8> (accessed: 21.06.2026).
11. Sysel, P., Rajmic, P. Goertzel algorithm generalized to non-integer multiples of fundamental frequency. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2012, 56 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2012-56> (accessed: 21.06.2026).
12. Edge AI. URL: <https://www.ultralytics.com/glossary/edge-ai> (accessed: 21.06.2026).
13. TensorFlow. URL: <https://www.tensorflow.org/> (accessed: 21.06.2026).
14. X-CUBE-AI. URL: <https://www.st.com/en/embedded-software/x-cube-ai.html> (accessed: 21.06.2026).

Історія статті:

Отримано: 02.07.2026 Доопрацьовано: 22.09.2026 Прийнято до друку: 23.09.2026 Опубліковано: 29.09.2026