

В. В. Олейнічук¹, О. А. Янковський², І. В. Ільїна²

¹ Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ЩІЛЬНОСТІ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ

Анотація. Актуальність. Рання діагностика змін щільності кісткової тканини є важливою складовою профілактики та лікування захворювань опорно-рухового апарату, зокрема остеопорозу та запальних процесів у пародонті. Традиційні методи оцінювання щільності кісткової тканини часто пов'язані з використанням іонізуючого випромінювання, високою вартістю обладнання та обмеженою доступністю, що ускладнює їх застосування в умовах сільської місцевості та мобільної медицини. **Об'єкт дослідження:** процеси поширення ультразвукових коливань у кістковій тканині. **Мета статті:** розробка мікроконтролерної системи для попереднього оцінювання змін щільності кісткової тканини на основі аналізу часу затримки проходження ультразвукового сигналу. **Результати дослідження.** У статті запропоновано експериментальну мікроконтролерну систему ультразвукової денситометрії, яка дозволяє здійснювати неінвазивний попередній аналіз стану кісткової тканини без використання рентгенологічних методів. Система забезпечує вимірювання часу затримки ультразвукового сигналу та відображення результатів у реальному часі, характеризується низьким енергоспоживанням і можливістю автономної роботи від малогабаритного джерела живлення. **Висновки.** Запропонована система підтверджує доцільність використання ультразвукових методів для попередньої оцінки щільності кісткової тканини та має перспективи подальшого вдосконалення за рахунок підвищення робочої частоти, амплітуди сигналів і оптимізації алгоритмів обробки даних. **Сфера використання отриманих результатів:** мобільні та стаціонарні системи первинної діагностики стану кісткової тканини, зокрема в умовах обмеженої медичної інфраструктури.

Ключові слова: щільність кісткової тканини; ультразвукова денситометрія; мікроконтролерна система; неінвазивна діагностика; час затримки сигналу; біомедичні вимірювання.

Вступ

Постановка проблеми. Пародонтит хронічне запальне захворювання опорного апарату зуба залишається однією з основних причин передчасної втрати зубів. Ключова особливість цієї патології - безсимптомний перебіг на ранніх стадіях, що значно ускладнює діагностику та своєчасне лікування. Тому, сучасна пародонтологія використовує комплексну оцінку клінічних, рентгенологічних та лабораторних показників для визначення ступеню резорбції альвеолярної кістки.

Водночас клінічні методи дослідження мають низку недоліків. Так для визначення глибини пародонтальних кишень притаманна значна між- та внутрішньо експертна варіабельність, яка залежить від сили тиску на зонд, гістологічної морфології ясен, архітекtonіки та геометрії пародонтальної кишені. Рентгенологічні методи, включно з конусно-променевою комп'ютерною томографією, пов'язані з значним іонізуючим променевим навантаженням і не завжди забезпечують достатню інформативність щодо стану тканин пародонта та ранніх запальних змін.

У зв'язку з цим актуальним є пошук нових неінвазивних, доступних та об'єктивних методів діагностики, які могли б доповнити існуючий діагностичний арсенал. Одним з перспективних напрямків цього пошуку, на наш погляд, є акустична діагностика. Метод базується на аналізі звукового відгуку біологічних тканин на зовнішній механічний вплив і дозволяє отримувати інформацію про їх структурно-механічні властивості. В стоматології вже застосовуються такі методи, як кількісна перкусійна діагностика та резонансно-частотний аналіз, які використовуються переважно для оцінки стабільності дентальних імплантатів, проте вони потребують спеціалізованого

обладнання та мають обмежену доступність. Патологічні запальні зміни в тканинах пародонта, зокрема резорбція кісткової тканини, деструкція лігаментарного апарату, та пов'язана з ними прогресуюча рухомість зубів, повинні супроводжуватися зміною параметрів акустичного відгуку, зокрема його спектральних та часових характеристик. Це створює передумови для використання аналізу акустичних ефектів як додаткового інструмента оцінювання стану альвеолярної кістки при патології пародонту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження змін щільності кісткової тканини є важливим напрямом сучасної медичної та біомедичної інженерії, оскільки порушення мінерального обміну кісткової тканини, безпосередньо пов'язане з розвитком остеопорозу, підвищеним ризиком переломів і як наслідок - зниженням якості життя пацієнтів. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, остеопороз належить до найпоширеніших метаболічних захворювань кісткової тканини, особливо серед людей похилого віку та жінок у постменопаузальний період [1]. Тому пошук ефективних, доступних і безпечних методів моніторингу порушення щільності кісткової тканини є актуальним.

На сьогодні «золотим стандартом» вимірювання мінеральної щільності кісткової тканини вважається двоенергетична рентгівівська абсорбціометрія (DXA). Цей метод забезпечує високу точність, відтворюваність результатів і широко використовується в клінічній діагностиці остеопорозу та прогнозування ризику переломів [2]. Міжнародне товариство клінічної денситометрії (ISCD) визначає DXA як основний інструмент для кількісної оцінки BMD та формування T- і Z-критеріїв [3]. Водночас численні наукові публікації вказують на обмеження DXA, зокрема високу вартість обладнання, стаціонарність системи, необхідність

спеціально навченого персоналу та використання іонізуючого випромінювання, що обмежує можливість частого або масового скринінгу [4]. У зв'язку з чим, активно досліджуються альтернативні методи оцінки стану кісткової тканини. Серед них значну увагу приділено кількісній комп'ютерній томографії (QCT), яка дозволяє отримувати об'ємні дані та окремо аналізувати стан кортикальних та трабекулярних складових кісткової тканини. Однак QCT супроводжується ще більшим променевим навантаженням і вищими витратами порівняно з DXA, що також обмежує її широке застосування [5].

Перспективним напрямом для створення портативних і недорогих систем є кількісна ультразвукова денситометрія (QUS). На відміну від DXA, ультразвукові методи не використовують іонізуючого випромінювання, що дозволяє проводити вимірювання в необмеженій кількості [6]. Дослідження показують, що параметри проходження ультразвукових хвиль через кісткову тканину корелюють з її механічними властивостями та мінеральною щільністю, особливо при дослідженні периферійних кісток, зокрема п'яtkової [7]. Проте автори зазначають, що результати QUS суттєво залежать від частоти сигналу, геометрії датчиків, алгоритмів обробки та стабільності умов вимірювання [8].

Останніми роками в наукових роботах дедалі більше уваги приділяється застосуванню мікроконтролерних систем у біомедичних вимірюваннях. Мікроконтролери забезпечують гнучкість, компактність, низьке енергоспоживання та можливість інтеграції датчиків, засобів обробки сигналів і бездротової передачі даних в одному пристрої [9]. У літературі описано приклади використання мікроконтролерів для ультразвукових, імпедансних та вібраційних методів оцінки властивостей кісткової тканини, що відкриває можливості для створення мобільних систем моніторингу [10].

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про актуальність розробки мікроконтролерної системи для дослідження змін щільності кісткової тканини. Поєднання сучасних мікроконтролерів із неіонізуючими методами вимірювання, зокрема ультразвуковими, дозволяє створити доступні, портативні та безпечні пристрої, що можуть доповнювати традиційні клінічні методи та розширювати можливості ранньої діагностики й динамічного спостереження.

Вище наведене зумовило мету даної роботи, а саме - розробку системи визначення змін щільності кісткової тканини альвеолярних відростків щелеп на основі аналізу акустичних ефектів, що виникають при перкусії зубів, з можливістю поєднання цього методу з аналізом фотографічних та рентгенологічних знімків для підвищення інформативності та об'єктивності діагностики.

Основний матеріал

Для оцінки щільності кісткової тканини пропонується експериментальна система, заснована на використанні ультразвукового методу денситометрії. Ультразвуковий підхід дозволяє здійснювати неінвазивний контроль структурно-механічних вла-

стивостей кісткової тканини без застосування іонізуючого випромінювання, що є важливим для багаторазових вимірювань. Структура запропонованої системи представлена на рис. 1. Система включає мікроконтролер, ультразвуковий випромінювач, приймач ультразвукового випромінювання, індикатор для відображення результатів вимірювань, а також джерело живлення. Мікроконтролер забезпечує управління режимами роботи випромінювача і приймача, обробку сигналу і формування вихідних даних, що характеризують стан кісткової тканини.

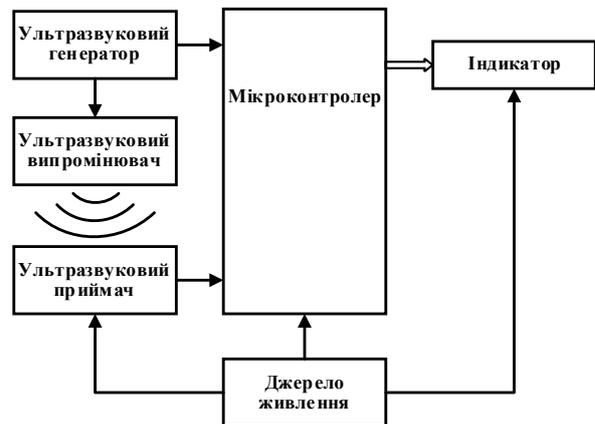


Рис. 1. Структура запропонованої системи

Робота системи здійснюється таким чином. Ультразвуковий випромінювач та ультразвуковий приймач розміщуються по різні боки досліджуваного об'єкта (рис. 2). Випромінювач формує ультразвукові коливання заданої частоти, які проходять крізь кісткову тканину та зазнають ослаблення і фазових змін залежно від її щільності та структурного стану. Приймач ультразвукового сигналу реєструє параметри хвилі, що пройшла через досліджуваний об'єкт. Отриманий сигнал надходить до мікроконтролера, де здійснюється його попередня обробка та аналіз. На основі змін амплітудних і часових характеристик ультразвукового сигналу формується інформативний параметр, який використовується для оцінки щільності кісткової тканини. Результати вимірювань відображаються на індикаторі системи.



Рис. 2. Приклад розташування ультразвукового випромінювача і приймача

Після активації кнопки «Старт» мікроконтролер формує керувальні імпульси з частотою 40 кГц, які подаються на ультразвуковий випромінювач. У цьому режимі виконується калібрування системи, під час якого на індикаторі відображається час затримки надходження ультразвукового сигналу на приймач.

Величина часу затримки ультразвукового сигналу залежить від акустичних властивостей дослі-

джуваного середовища та, зокрема, від щільності кісткової тканини. Тому на основі отриманих даних можна зробити попередні висновки щодо стану та змін щільності кісткової тканини об'єкта дослідження. Для підвищення достовірності аналізу результатів вимірювань доцільно виконувати порівняльні вимірювання на еталонному об'єкті аналогічного типу та геометричних розмірів, який не має патологічних змін. На рис. 3 наведено сигнали з виходу генератора ультразвукових коливань і з виходу приймача ультразвуку за відсутності об'єкта дослідження, де верхній сигнал відповідає сигналу передавача, а нижній – сигналу приймача.

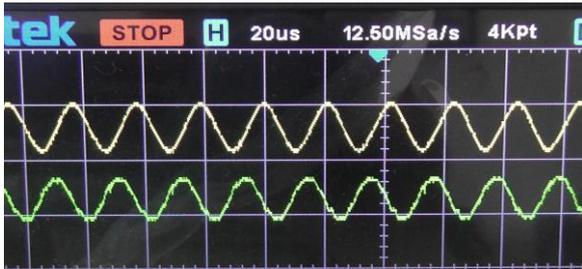


Рис. 3. Сигнали з виходу генератора ультразвуку і на виході приймача ультразвуку (верхній сигнал – сигнал передавача, нижній сигнал – вихід приймача) при відсутності об'єкта дослідження

На рис. 4 показано відповідні сигнали на входах мікроконтролера після їх перетворення у прямокутну форму. Для отримання наведених осцилограм використовувався цифровий осцилограф Hantek.

Мікроконтролер виконує аналіз часової різниці між моментами надходження імпульсів від генератора ультразвукових коливань і від приймача ультразвуку. Результат вимірювання, виражений у мікросекундах, виводиться на екран індикатора.

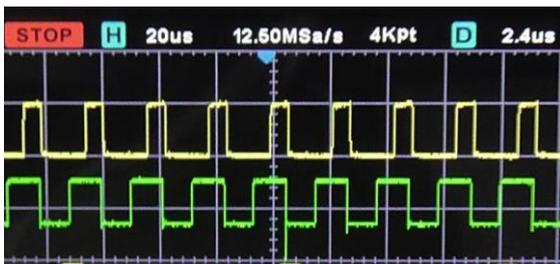


Рис.4. Сигнали на входах мікроконтролера (верхній сигнал – сигнал передавача, нижній сигнал – вихід приймача) за відсутності об'єкта дослідження

Перед проведенням основних вимірювань випромінювач і приймач ультразвукового сигналу розміщуються співвісно один навпроти одного на відстані, що відповідає ширині досліджуваного об'єкта. У цьому режимі на індикаторі відображається час затримки надходження сигналу на приймач, який використовується як еталонне значення.

Після цього випромінювач і приймач розташовуються по різні боки досліджуваного об'єкта, і виконується вимірювання часу проходження ультразвукового сигналу крізь нього у вигляді затримки його надходження на приймач.

Отримані сигнали на входах мікроконтролера та відповідне значення часу затримки відображаються на індикаторі системи. За величиною часу затримки можна зробити попередні висновки щодо щільності кісткової тканини об'єкта дослідження, з урахуванням того, що швидкість поширення ультразвукових хвиль зростає зі збільшенням щільності матеріалу, через який вони проходять. Відповідно, зменшення щільності кісткової тканини призводить до збільшення часу затримки проходження сигналу.

При випробуванні системи було проведено експеримент, щодо обстеження пацієнта для виявлення патології кісткової тканини. Система визначила затримку проходження сигналу під зубами №5 внизу ліворуч і внизу праворуч, оскільки були підозри щодо стану кісткової тканини під таким зубом ліворуч. Під здоровим зубом час затримки склав 3 мкс, а під проблемним зубом 6 мкс. При подальшому обстеженні рентгенівський знімок показав наявність у пацієнта гранульоми під цим зубом.

Висновки

Під час проведення дослідження було запропоновано експериментальну мікроконтролерну систему для оцінювання змін щільності кісткової тканини на основі ультразвукового методу денситометрії. Такий підхід надає змогу здійснювати попередній аналіз стану кісткової тканини без використання рентгенологічних методів дослідження та без залучення коштовного спеціалізованого обладнання.

Система характеризується низьким енергоспоживанням, що дозволяє використовувати малогабаритні акумуляторні джерела живлення та забезпечує можливість автономної роботи. Це робить її особливо актуальною для застосування в умовах обмеженої інфраструктури, зокрема у сільській місцевості, мобільних медичних пунктах і польових умовах. Результати проведених експериментальних досліджень свідчать, що вимірювання часу затримки проходження ультразвукового сигналу крізь об'єкт дає змогу зробити попередні висновки щодо щільності кісткової тканини. Розроблена система є інформативним засобом для експрес-оцінки стану кісткової тканини з відображенням даних у режимі реального часу. Отримані результати підтверджують доцільність подальшого вдосконалення запропонованого методу.

Перспективи удосконалення полягають у розширенні функціональних можливостей за рахунок інтеграції додаткових методів аналізу та підвищення точності вимірювань.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Perez, Mariana Ortega. Osteoporosis and fracture risk assessment: improving outcomes in postmenopausal women [Text] / Perez Mariana Ortega [et al.] // Revista da Associação Médica Brasileira. – 2023. – Volume: 69 Supplement 1. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9282.2023S130>
2. Sangondimath Gururaj. DEXA and Imaging in Osteoporosis [Text] / Gururaj Sangondimath, Ramesh Kumar Sen, Fazal Rehman // Indian Journal of Orthopaedics. 2023. Vol. 57. P. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43465-023-01059-2>.
3. Goel, Heenam. Iinical Use of Trabecular Bone Score: The 2023 ISCD Official Positions [Text] / Heenam Goel [et al.] // J Clin Densitom. – 2024. – Vol. 2024 Jan-Mar, 27(1).101452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2023.101452>.
4. Evenepoel, Pieter. "European Consensus Statement on the diagnosis and management of osteoporosis in chronic kidney disease stages G4–G5D [Text] / Pieter Evenepoel [et al.] // Nephrology Dialysis Transplantation. – 2020. – Vol. 36, no. 1. – P. 42–59. DOI: <https://doi.org/10.1093/ndt/gfaa192>.
5. Gazzotti, Silvia. High-resolution peripheral quantitative computed tomography: research or clinical practice? [Text] / Silvia Gazzotti [et al.] // The British Journal of Radiology. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1259/bjr.20221016>.
6. Figueredo, Carlos Alberto. Use of ultrasound imaging for assessment of the periodontium: A systematic review / Carlos Alberto Figueredo [et al.] // Journal of Periodontal Research. – 2023. – P. 3-17. DOI: <https://doi.org/10.1111/jre.13194>.
7. Hans D. Quantitative ultrasound for the detection and management of osteoporosis / Didier Hans, Marc-Antoine Krieg // Salud Pública de México. – 2009. – Vol. 51. – P. 25–37. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0036-36342009000700006>.
8. Bone Quantitative Ultrasound [Electronic resource] / ed. by P. Laugier, G. Haïat. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2011. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0017-8>.
9. Webster J.G. Medical Instrumentation: Application and Design. 4th ed., Wiley, 2010., URL: https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf/z01_978-0-471-67600-3_01.pdf
10. Pawase, C., D'Souza, S. (2025). Revolutionizing Biomedical Engineering with Microcontroller Applications: A Comprehensive Review. In: Tripathi, A., Soni, A., Tiwari, M., Swarnkar, A., Sahariya, J. (eds) Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems. ICTSES 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1277. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8429-5_19.

Received (Надійшла) 22.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Олейнічук Валерій Вікторович – кандидат медичних наук, доцент кафедри стоматології Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна.

Valery Oleinichuk – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Stomatology of the Kharkiv National University named after V. N. Karazina, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: v.v.oleinichuk@karazin.ua; ORCID Author ID <https://orcid.org/0000-0002-6690-6986>;

Scopus Author ID <https://www.scopus.com/pages/home?display=basic#basic>.

Янковський Олександр Аркадійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleksandr Yankovsky – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleksandr.yankovskiy@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1268-0029>.

Ільїна Ірина Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Iryna Ilina – candidate of technical sciences (Ph.D), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: iryna.ilina@nure.ua; ORCID Author ID <https://orcid.org/0000-0003-3132-7949>;

Scopus Author ID <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202223262>.

Microcontroller-based system for studying changes in bone tissue density

Valery Oleinichuk, Oleksandr Yankovsky, Iryna Ilina

Abstract. Relevance. Early diagnosis of changes in bone tissue density is an important component of the prevention and treatment of musculoskeletal diseases, particularly osteoporosis and inflammatory processes in the periodontium. Traditional methods for assessing bone density are often associated with the use of ionizing radiation, high equipment costs, and limited availability, which complicates their application in rural areas and mobile medical practice. **Object of study:** processes of ultrasonic wave propagation in bone tissue. **Purpose of the article:** to develop a microcontroller-based system for preliminary assessment of changes in bone tissue density based on the analysis of the time delay of ultrasonic signal propagation. **Research results.** The article proposes an experimental microcontroller-based ultrasonic densitometry system that enables non-invasive preliminary analysis of bone tissue condition without the use of radiographic methods. The system provides measurement of ultrasonic signal delay time and real-time visualization of the results, features low power consumption, and supports autonomous operation powered by a compact energy source. **Conclusions.** The proposed system confirms the feasibility of using ultrasonic methods for preliminary assessment of bone tissue density and demonstrates potential for further improvement through increasing operating frequency, signal amplitude, and optimization of data processing algorithms. **Scope of application of the obtained results:** mobile and stationary systems for primary diagnostics of bone tissue condition, particularly in environments with limited medical infrastructure.

Keywords: bone tissue density; ultrasonic densitometry; microcontroller-based system; non-invasive diagnostics; signal delay time; biomedical measurements.