

УДК 534.7

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ШУМІВ КОЛІННИХ СУГЛОБІВ**В. С. БЕРЕГУН, Т. А. ГОРОВЕЦЬКА, О. І. КРАСИЛЬНІКОВ***Національний технічний університет України “КПІ”, Київ**Одержано 04.04.2011*

З використанням кумулянтного аналізу й ортогональних подань щільності ймовірності проведено статистичний аналіз шумів колінних суглобів. Виявлено інформативність старших кумулянтних коефіцієнтів і щільності ймовірності миттєвих значень шуму (фоноартрограм) і рівнів звукового тиску для встановлення діагностичних ознак норми й патологій – фіброзного й деформуючого артрозу. Аналіз проведено як для всієї тривалості записів шумів, так і по характерних секторах.

С использованием кумулянтного анализа и ортогональных представлений плотности вероятности проведен статистический анализ шумов коленных суставов. Выявлена информативность старших кумулянтных коэффициентов и плотности вероятности мгновенных значений шума (фоноартрограм) и уровней звукового давления для установления диагностических признаков нормы и патологий – фиброзного и деформирующего артроза. Анализ проведен как для всей длительности записей шумов, так и по характерным секторам.

The paper deals with statistical analyzing of noise of knee joints using the cumulant analysis and orthogonal representations for probability density. For setting of the diagnostic signs for normal state and pathologies (fibrous or deforming arthrosis), the informativeness has been discovered for highest cumulant coefficients and probability density of the instant noise values (phonoarthrogramms) and sound pressure levels. The analysis has been performed for both the overall length of noise records, and characteristic sectors.

ВСТУП

Патології суглобів посідають перше місце серед захворювань опорно-рухового апарату й становлять близько 15 % від їхньої загальної кількості [1–3]. Найпоширеніші захворювання суглобів – дегенеративно-дистрофічні ураження, які найчастіше виникають у колінному суглобі, вражаючи людей як працездатного періоду життя, так і старшого й похилого віку. Першопричинами виникнення дегенеративно-дистрофічного процесу в суглобі вважаються біохімічні й мікроциркуляторні порушення у хрящі й кістковій тканині епіфіза [1]. Механічні й статичні навантаження додатково руйнують неповноцінні хондроцити, кісткову тканину епіфіза, що супроводжується розвитком клінічної й рентгенологічної картини захворювання.

Артрозні зміни в суглобах [2] – незворотний і прогресуючий процес, успішне лікування якого прямо пов'язане зі своєчасною й точною постановкою діагнозу. При цьому найбільш складним є виявлення саме ранніх стадій захворювання.

До традиційних методів діагностики захворювань колінних суглобів відносять клінічно-рентгенологічні методи, аускультацию, ультразвукове дослідження, артроскопію, магнітно-резонансну томографію, біохімічні, імунологічні, термографічні методи та ін. [4–8]. Однак усі вони ефективні в основному на пізніх стадіях захворювання.

Останнім часом значного поширення набули перспективні акустоартрографічні методи – вібро-

артрографія [9–16] й фоноартрографія [17–23].

Віброартрографія базується на дослідженні віброартрограм – вібрацій колінного суглоба при його згинанні/розгинанні. Внаслідок нестационарності вібрацій для отримання інформації про нормальність/аномальність сигналу віброартрограми, як правило, розбивають на сегменти (метод адаптивної сегментації [9–13]) з подальшим дослідженням спектральної щільності потужності [10], дисперсії [14], вищих моментів – коефіцієнтів асиметрії та ексцесу [15]. Відзначимо також поширені спроби дослідження законів розподілу віброартрограм – нормалізованих гістограм [15], ядерних оцінок з нормальним ядром [16].

Фоноартрографія базується на дослідженні фоноартрограм – акустичного шуму, який реєструється при згинанні/розгинанні колінного суглоба. Так, для діагностування можливих станів колінних суглобів авторами досліджувались діапазони миттєвих значень сигналу фоноартрограм [22] та їхні рівні звукового тиску, спектральні щільності потужності [22, 23].

Таким чином, задача ранньої діагностики захворювань колінних суглобів актуальна для сучасної медицини й потребує створення надійних методів для їх виявлення й класифікації. Найбільш придатними для цього можуть виявитись акустоартрографічні (віброартрографія і фоноартрографія) методи, які базуються на аналізі сигналів під час руху колінного суглоба й відрізняються способом їхньої реєстрації. Особливості таких сигналів полягають у їхньому випадковому й нестацио-

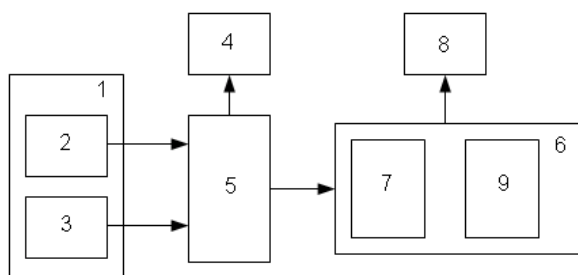


Рис. 1. Блок-схема автоматизованої системи для діагностики колінних суглобів

нарному характері, що потребує розбиття записів на інтервали стаціонарності – сегментації. Основна задача при використанні артрографічних методів – пошук діагностичних параметрів сигналів шляхом проведення статистичної обробки.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для дослідження використаємо фоноартрограми, які отримані за допомогою автоматизованої системи для діагностики колінних суглобів, описаної у працях [20, 22].

Система для діагностики колінних суглобів (рис. 1) здійснює реєстрацію шумів, що виникають у суглобі під час руху, та проводить подальший статистичний аналіз зареєстрованих сигналів. Коротко опишемо її склад. На підставці 1 закріплено датчик кутових переміщень голілки 2, до якого підключається мікрофонний датчик 3. Ці датчики через блок збору інформації 5 з'єднані з пристроєм введення акустичної інформації 7, який встановлено в комп'ютері 6. Паралельно до блоку збору інформації приєднуються головні телефони 4. На жорсткому диску комп'ютера встановлено спеціалізоване програмне забезпечення 9. Результати обробки візуалізуються на моніторі 8.

Розглянемо принцип роботи даної системи. Датчик кутових переміщень перетворює кутове переміщення голілки пацієнта в електричну напругу. Мікрофонний датчик перетворює акустичні шуми, що виникають в колінному суглобі при його русі, у відповідний електричний сигнал. Блок збору інформації узгоджує вихідні електричні сигнали датчика кутових переміщень і мікрофонного датчика з пристроєм вводу аналогової інформації, який перетворює двоканальну аналогову інформацію з виходу блоку збору інформації у цифрові відліки та вводить їх у комп'ютер. Конструктивно пристрій введення виконаний у вигляді друкованої плати, яка встановлюється у слот (інтерфейсний роз'єм материнської плати) комп'ютера.

Головні телефони призначені для одночасного із введенням інформації прослуховування шумів суглоба. Пакет спеціалізованих програм забезпечує взаємодію технічних засобів системи, виконує обробку акустичних сигналів, здійснює зберігання, документування результатів й візуалізацію їх на моніторі.

Розглянемо детальніше основні електричні параметри системи. Чутливість мікрофона складає 1.5 мВ/Па. Підсилення сигналу ($K=100$ (40 дБ)) з мікрофонного датчика обрано таким чином, щоб забезпечити максимальні значення сигналу ± 1 В. При цьому напруга, що відповідає опорному значенню тиску $2 \cdot 10^{-5}$ Па (0 дБ), дорівнює 3 мкВ. Загальний рівень електронного й акустичного шуму, а також шуму мікрофона становив 71 дБ. Максимальним значенням сигналу 1 В відповідає рівень 107 дБ. Оскільки вимірювання шуму здійснювалось на відстані 1 см від суглоба, то при приведенні рівнів до відстані 1 м необхідно знизити розрахункові величини усіх рівнів на 40 дБ. Як результат отримуємо рівень шуму 31 дБ, а максимальний рівень сигналу – 67 дБ. Таким чином, динамічний діапазон такої системи становить 36 дБ.

Коротко розглянемо застосовану методику. Перед проведенням досліджень на задню частину стегна встановлюється підставка, датчик кутових переміщень закріплюється до голілки пацієнта, мікрофонний датчик підтримується оператором системи по центру колінного суглоба. Після стартового звукового сигналу, який подається з комп'ютера, пацієнт починає здійснювати плавні рухи голілкою з вихідного положення – вертикально по відношенню до підлоги (0°) до повного випрямлення (90°) і назад. У процесі виконання двох-трьох рухів здійснюється двоканальне введення в комп'ютер сигналів з мікрофонного датчика й датчика кутових переміщень. Для введених даних виконуються процедури обробки, за результатами яких на бланку фіксується попередній діагноз.

У результаті обробки встановлено [22], що частотний діапазон шумів колінних суглобів складає (200...6000) Гц, що загалом підтверджується результатами праці [23]. У якості образів, які несуть діагностичні ознаки, авторами були запропоновані згладжені фоноартрограми [19, 22] – залежності миттєвих значень звукового тиску від кута розгину суглоба, кутові розподіли рівнів звукового тиску – залежності рівнів звукового тиску від кутового переміщення суглоба, а також усереднені рівні спектральної щільності. Додатковим діагностичним параметром було запропоновано вважати максимальний кут розгину суглоба, який характе-

ризує його рухливість. Прослуховування отриманих аудіозаписів акустичного шуму через головні телефони підтвердило існування чіткої залежності між “аудіообрами” шумів суглобів і вибраними діагностичними характеристиками.

Аналіз результатів проведених досліджень виявив, що для суглобів, стан яких відповідає нормі, фоноартрограми не виходять за межі ± 0.05 В, а рівні спектральної щільності практично рівномірні у діапазоні частот (1...6) кГц. При фіброзному артрозі суглоба у певних кутових секторах присутні імпульси, амплітуда яких не перевищує 0.3 В, а частотний склад характеризується значним підвищенням спектральних рівнів у діапазоні від 200 Гц до 4 кГц. При деформуючому артрозі імпульси присутні в усьому діапазоні руху, причому їхні амплітуди можуть сягати 1 В, а спектральні рівні значно підвищуються в діапазоні від 100 Гц до 4 кГц. Природно, що кожному з таких характерних записів (реалізацій) будуть відповідати різні ймовірнісні характеристики.

Подальша мета даної роботи полягає в дослідженні ймовірнісних характеристик шумів колінних суглобів для пошуку нових діагностичних ознак.

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виконано обробку фоноартрограм, які відповідають встановленому лікарем діагнозу: досліджені числові характеристики – моменти й кумулянтні коефіцієнти вищих порядків, а також щільності ймовірності миттєвих значень (у вольтах) і рівнів звукового тиску (в децибелах). Це дало змогу виявляти захворювання чи ушкодження колінних суглобів, виходячи зі статистичної обробки фоноартрограм. Для знаходження ймовірнісних характеристик шумів колінних суглобів використовувались методи прикладної теорії випадкових процесів і прикладної статистики.

Нагадаємо, що початковий момент α_k порядку k процесу $\xi(t)$ задається виразом

$$\alpha_k = \int_{-\infty}^{\infty} x^k p(x) dx,$$

де $p(x)$ – щільність імовірності процесу $\xi(t)$. Математичне сподівання визначається як $m = \alpha_1$, а середнє квадратичне відхилення – $\sigma = \sqrt{\alpha_2 - \alpha_1^2}$.

Нехай ξ_i , $i = \overline{1, N}$ – вибірка з шуму колінних суглобів об'ємом N . Незміщена і слухна оцінка початкових моментів α_k здійснюється за форму-

лою [24]:

$$\bar{\alpha}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i^k.$$

Додатковими числовими характеристиками будуть кумулянти κ_k порядку k , які є функціями початкових моментів, наприклад:

$$\kappa_1 = \alpha_1, \quad \kappa_2 = \alpha_2 - \alpha_1^2, \quad \kappa_3 = \alpha_3 - 3\alpha_2\alpha_1 + 2\alpha_1^3,$$

$$\kappa_4 = \alpha_4 - 4\alpha_3\alpha_1 - 3\alpha_2^2 + 12\alpha_2\alpha_1^2 - 6\alpha_1^4,$$

і т. д. [24]. Кумулянтні коефіцієнти γ_k визначаються виразом $\gamma_k = \kappa_k / \kappa_2^{k/2}$.

Для якісної оцінки щільності ймовірності $p(x)$ використано гістограму. При її побудові весь діапазон значень вибірки $\xi_{\min} \dots \xi_{\max}$ розбивається на K ($K \approx 1 + 3.32 \lg N$) інтервалів ширини Δx і підраховується кількість відліків у j -му інтервалі N_j . Гістограма визначається на кожному інтервалі

$$\bar{p}(x_j) = \frac{N_j}{N \Delta x},$$

даючи лише якісну оцінку щільності ймовірності.

Для отримання аналітичного виразу щільності ймовірності її розвинуто в ортогональне подання [24–27]:

$$p(x) = \rho(x) \sum_{k=0}^{\infty} c_k \varphi_k(x),$$

де $\varphi_k(x)$ – ортогональні поліноми з ваговою функцією $\rho(x)$; c_k – коефіцієнти розкладу функції початкових моментів α_k .

Для знаходження оцінки щільності ймовірності замість початкових моментів використані їхні оцінки $\bar{\alpha}_k$:

$$\bar{p}(x) = \rho(x) \sum_{k=0}^{\infty} \bar{c}_k \varphi_k(x).$$

Частота дискретизації становила 44700 Гц, що відповідає кроковій дискретизації 22.37 мкс. При середній тривалості одного повного руху $0^\circ - 90^\circ - 0^\circ$ (2...4) с об'єм вибірки N складав (90000...180000) відліків ξ_i , $i = \overline{1, N}$.

При обробці миттєвих значень сигналу використовувалась згладжена вибірка $\hat{\xi}_k$, $k = \overline{0, [N/16] - 1}$ по шістнадцяти відліках:

$$\hat{\xi}_k = \frac{1}{16} \sum_{j=1}^{16} \xi_{16k+j},$$

де $[N/16]$ – ціла частина від $N/16$.

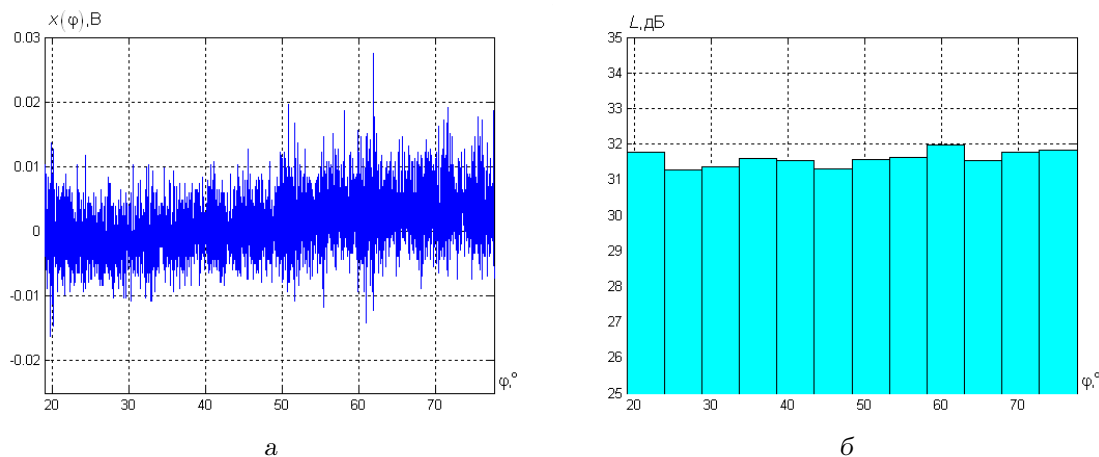


Рис. 2. Запис 1 (увесь діапазон кутів повороту):
 а – фоноартрограма; б – середні рівні звукового тиску

Табл. 1. Числові характеристики для фоноартрограми запису 1

$\varphi, ^\circ$	19...78	19...40	40...60	60...78
$m, В$	0.0012	-0.0007	0.0013	0.0033
$\sigma, В$	0.0048	0.0041	0.0047	0.0050
γ_3	0.3787	0.0692	0.3650	0.2441
γ_4	0.4345	0.0765	-0.0913	0.5261
γ_5	0.6951	-0.1902	-0.7011	0.0807
γ_6	3.2492	1.1371	-0.6991	0.0249

Табл. 2. Числові характеристики рівнів звукового тиску запису 1

$\varphi, ^\circ$	19...78	19...40	40...60	60...78
$m, дБ$	31.2591	31.2501	31.1469	31.3688
$\sigma, дБ$	1.3898	1.3856	1.3415	1.3367
γ_3	-0.4938	-0.2887	-0.7329	0.0759
γ_4	1.5343	0.6039	1.4324	0.3312
γ_5	-2.5335	-0.1431	-1.6083	0.7514
γ_6	8.1372	1.3278	-2.7385	0.4965

Для знаходження оцінки щільності ймовірності фоноартрограми, виходячи з діапазону миттєвих значень запису $(-\infty; \infty)$, було використано ряд Ерміта [24–27]:

$$\bar{p}(x) = \frac{1}{\sigma} \rho_H \left(\frac{x - \bar{m}}{\bar{\sigma}} \right) \sum_{k=0}^4 \bar{c}_{Hk} H_k \left(\frac{x - \bar{m}}{\bar{\sigma}} \right),$$

де $H_k(x)$ – поліноми Ерміта з ваговою функцією $\rho_H(x) = \exp(-x^2/2)$; $x \in (-\infty; \infty)$, \bar{c}_{Hk} , \bar{m} , $\bar{\sigma}$ – оцін-

ки коефіцієнтів розкладу, математичного сподівання й середнього квадратичного відхилення відповідно.

При обробці рівнів звукового тиску сигналу використовувалась згладжена вибірка $\hat{\xi}_k$, $k=0, [N/32]-1$, отримана по тридцяти двох відліках:

$$\hat{\xi}_k = 20 \lg \left[\frac{1}{3 \cdot 10^{-6}} \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{j=1}^{32} \left[\xi_{32k+j}^\circ \right]^2} \right].$$

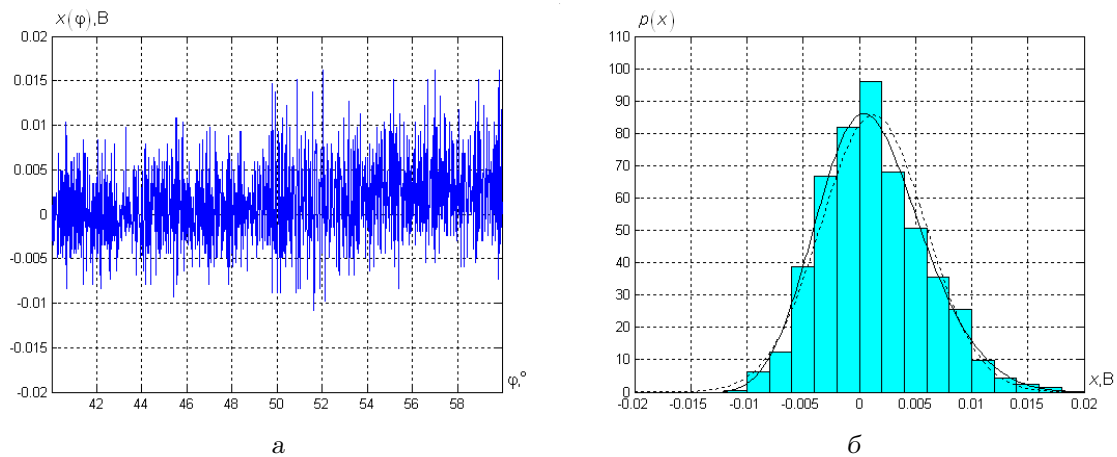


Рис. 3. Запис 1 [(40...60)°]:
а – фоноартрограма; б – відповідні щільності ймовірності й гістограма

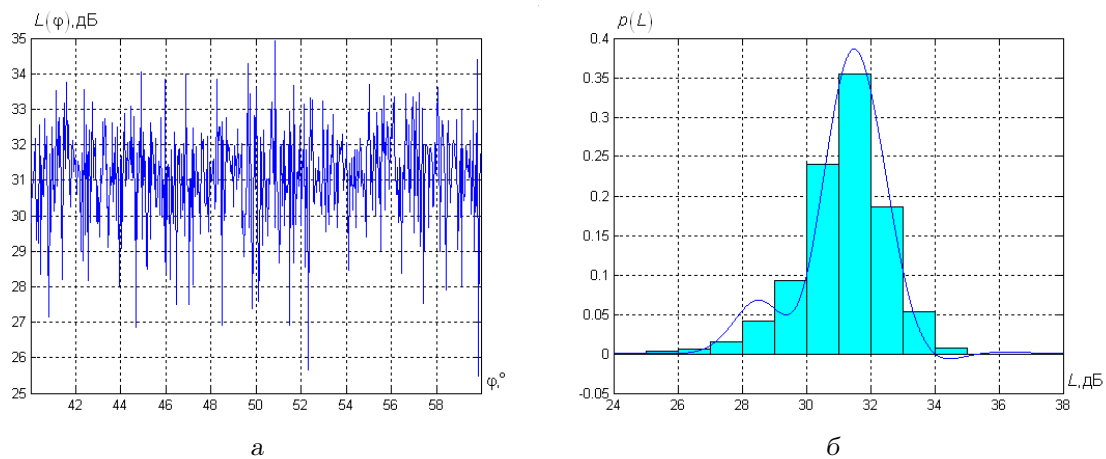


Рис. 4. Запис 1 [(40...60)°]:
а – рівні звукового тиску; б – відповідні щільність ймовірності й гістограма

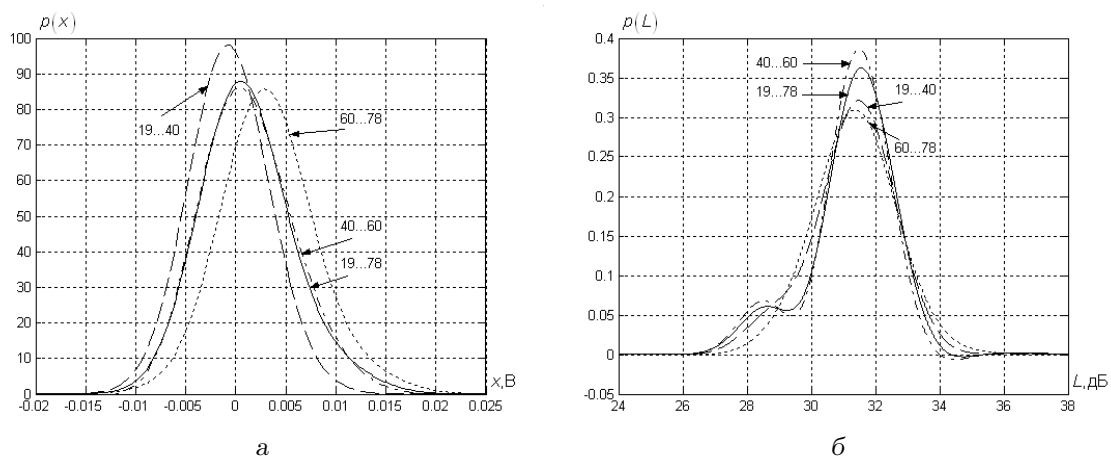


Рис. 5. Запис 1, порівняння щільностей ймовірності при різних кутах повороту:
а – для фоноартрограми; б – для рівнів звукового тиску

Для знаходження оцінки щільності ймовірності рівнів звукового тиску сигналу, виходячи з очікуваного діапазону рівнів (20 дБ; ∞), було використано ряд Лагерра [26, 27]

$$\bar{p}(x) = \frac{1}{\beta} \rho_L \left(\frac{x-20}{\beta} \right) \sum_{k=0}^4 \bar{c}_{Lk} L_k(\bar{\lambda}) \left(\frac{x-20}{\beta} \right),$$

де $L_k^{(\lambda)}(x)$ – поліноми Лагерра з параметром λ і ваговою функцією $\rho_L(x) = \exp(-x)x^\lambda$; $\bar{\lambda} = \bar{m}^2 / \bar{\sigma}^2 - 1$, $\bar{\beta} = \bar{\sigma}^2 / \bar{m}$, \bar{c}_{Lk} – оцінки коефіцієнтів розкладу.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ

Загалом було оброблено понад 30 записів. З кількох записаних рухів пацієнта вгору-вниз найбільш інформативними виявились рухи вгору, серед яких було обрано один найбільш характерний. Наведемо результати обробки для трьох записів з поставленими лікарем діагнозами: 1 – норма, 2 – фіброзний артроз, 3 – деформуючий артроз.

3.1. Запис 1 (норма)

Мінімальне кутове положення суглоба – 19° , максимальне кутове положення суглоба – 78° . Об'єм вибірки – 49885 відліків. Для цього запису миттєві значення (фоноартрограма, рис. 2, а) лежать у межах ± 0.025 В, а рівні звукового тиску (на рис. 2, б – середні на 12-ти інтервалах) у межах (24...37) дБ і визначаються загальним шумом електроакустичного тракту. На всій фоноартрограмі практично відсутні скільки-небудь суттєві імпульси.

У табл. 1 наведені числові характеристики фоноартрограм для $(19 \dots 78)^\circ$ (уесь діапазон руху), $(19 \dots 40)^\circ$, $(40 \dots 60)^\circ$, $(60 \dots 78)^\circ$, а у табл. 2 – числові характеристики рівнів звукового тиску для тих же діапазонів.

З табл. 1 і 2 видно, що математичне сподівання й дисперсія залишаються практично незмінними для різних діапазонів. На основі цього можна стверджувати, що в даному разі шум стаціонарний відносно математичного сподівання і дисперсії.

На рис. 3, а зображено відрізок фоноартрограми для $(40 \dots 60)^\circ$, а на рис. 3, б – щільність ймовірності й гістограму для цього діапазону, а також графік щільності ймовірності нормального розподілу (штрихова крива) з математичним сподіванням і дисперсією відрізка сигналу. На рис. 4, а зображено рівні звукового тиску у децибелах відрізка фоноартрограми для $(40 \dots 60)^\circ$, а на рис. 4, б – щільність ймовірності й гістограму для цього діапазону.

На рис. 5, а побудовані графіки щільностей ймовірності фоноартрограм запису 1, а на рис. 5, б – відповідні графіки щільностей ймовірності рівнів звукового тиску для діапазонів $(19 \dots 78)^\circ$, $(19 \dots 40)^\circ$, $(40 \dots 60)^\circ$, $(60 \dots 78)^\circ$.

З порівняння з відповідними гістограмами на рис. 3 і 4 випливає, що щільності ймовірності фоноартрограм достатньо добре описуються рядом Ерміта, а щільності ймовірності рівнів звукового тиску – рядом Лагерра. Розподіл рівнів скрізь має від'ємний коефіцієнт асиметрії γ_3 . Поява від'ємних значень ряду Лагерра на рис. 4, б зумовлена зростанням коефіцієнта ексцесу γ_4 для діапазону $(40 \dots 60)^\circ$, унаслідок чого не виконуються умови невід'ємності, знайдені в роботі [28].

3.2. Запис 2 (фіброзний артроз)

Мінімальне кутове положення суглоба – 0° , максимальне кутове положення суглоба – 90° . Об'єм вибірки – 63019 відліків. Цей запис характеризується появою веретеноподібних імпульсів (“ромбів”) для відрізків близько 10° з амплітудами ≤ 0.3 В. Також у записі присутні короточасні імпульси. На рис. 6, а наведено фоноартрограму, а на рис. 6, б – середні рівні звукового тиску на 18-ти інтервалах.

У табл. 3 наведені числові характеристики фоноартрограм для діапазонів $(0 \dots 90)^\circ$ (уесь діапазон руху), $(7 \dots 23)^\circ$ (перший “ромб”), $(23 \dots 40)^\circ$ (другий “ромб”), $(40 \dots 60)^\circ$ (наявність одного короточасного імпульсу середньої амплітуди), $(60 \dots 80)^\circ$ (наявність кількох короточасних імпульсів малої амплітуди), $(80 \dots 90)^\circ$ (третій “ромб”). У табл. 4 відображені рівні звукового тиску для тих же діапазонів.

Як видно з табл. 3, “ромби” супроводжуються від'ємними значеннями кумулянтного коефіцієнта γ_6 для фоноартрограм, а поява одного короточасного імпульсу середньої амплітуди призводить до значного зростання коефіцієнта ексцесу γ_4 , а також γ_5 і γ_6 .

На рис. 7, а зображено відрізок фоноартрограми для діапазону $(23 \dots 40)^\circ$, а на рис. 7, б – щільність ймовірності й гістограму для цього діапазону, а також графік щільності ймовірності нормального розподілу (штрихова крива) з математичним сподіванням і дисперсією відрізка сигналу. На рис. 8, а зображено рівні звукового тиску у децибелах відрізка фоноартрограми для $(23 \dots 40)^\circ$, а на рис. 8, б – щільність ймовірності й гістограму для цього ж діапазону. На рис. 9, а побудовані графіки щільностей ймовірності фоноартрограм, а на рис. 9, б – графіки щільності ймовірності рівнів

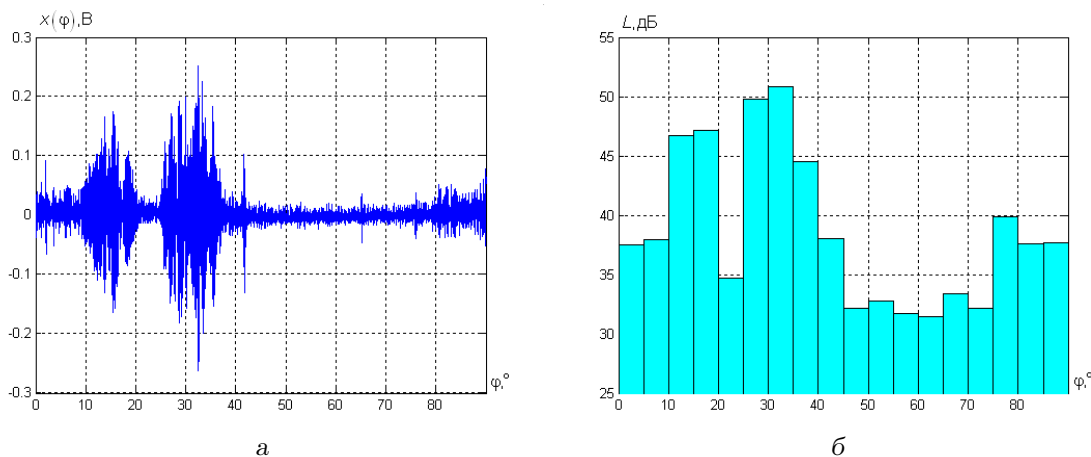


Рис. 6. Запис 2 (увесь діапазон кутів повороту):
а – фоноартрограма; б – середні рівні звукового тиску

Табл. 3. Числові характеристики для фоноартрограми запису 2

$\varphi, ^\circ$	0...90	7...23	23...40	40...60	60...80	80...90
$m, \text{В}$	0.0019	0.0064	0.0042	-0.0025	-0.0007	0.0027
$\sigma, \text{В}$	0.0397	0.0493	0.0735	0.0125	0.0091	0.0193
γ_3	0.3162	-0.0410	0.0308	0.76705	0.1967	0.4056
γ_4	7.2665	1.1886	0.8515	33.119	1.7955	0.3436
γ_5	1.9211	-0.2820	0.1225	98.897	-3.6919	-0.2651
γ_6	68.7150	-4.5549	-4.4520	2944.2	11.9705	-0.8640

Табл. 4. Числові характеристики рівнів звукового тиску запису 2

$\varphi, ^\circ$	0...90	7...23	23...40	40...60	60...80	80...90
$m, \text{дБ}$	34.3213	37.7709	40.0861	30.7221	31.2364	33.6082
$\sigma, \text{дБ}$	5.7965	5.3538	6.2726	3.1446	3.7160	3.1301
γ_3	0.8125	-0.0909	-0.1328	0.6257	2.0535	0.2984
γ_4	0.2358	-0.6697	-0.9866	4.7746	8.8753	0.3597
γ_5	-2.8607	-0.1466	0.8051	17.3285	34.4396	-0.9154
γ_6	-8.3084	3.4168	5.2667	60.8140	110.1725	-3.1033

звукового тиску сигналу для діапазонів $(0...90)^\circ$, $(7...23)^\circ$, $(23...40)^\circ$, $(80...90)^\circ$.

Як видно з рис. 7 і 8 щільності ймовірності миттєвих значень фоноартрограм достатньо добре описуються рядом Ерміта, а щільності ймовірності рівнів звукового тиску – рядом Лагерра. Поява суттєвих від'ємних значень ряду Ерміта на рис. 9, а $((0...90)^\circ)$ спричинена поодиноким імпульсом в діапазоні $(40...50)^\circ$ (див. рис. 6, а) і його впливом на вищі кумулянтні коефіцієнти, внаслідок чого не виконуються умови невід'ємності.

3.3. Запис 3 (деформуючий артроз)

Мінімальне кутове положення суглоба – 17° , максимальне кутове положення суглоба – 90° . Об'єм вибірки – 47962 відліки. Цей запис характеризується появою короткотривалих імпульсів амплітудою до 1 В на відрізках $(1...3)^\circ$ (“кліків”). Також у фоноартрограмі присутні “ромби”. На рис. 10, а наведено фоноартрограму, а на рис. 10, б – середні рівні звукового тиску на 15-ти інтервалах.

У табл. 5 наведені числові характеристики

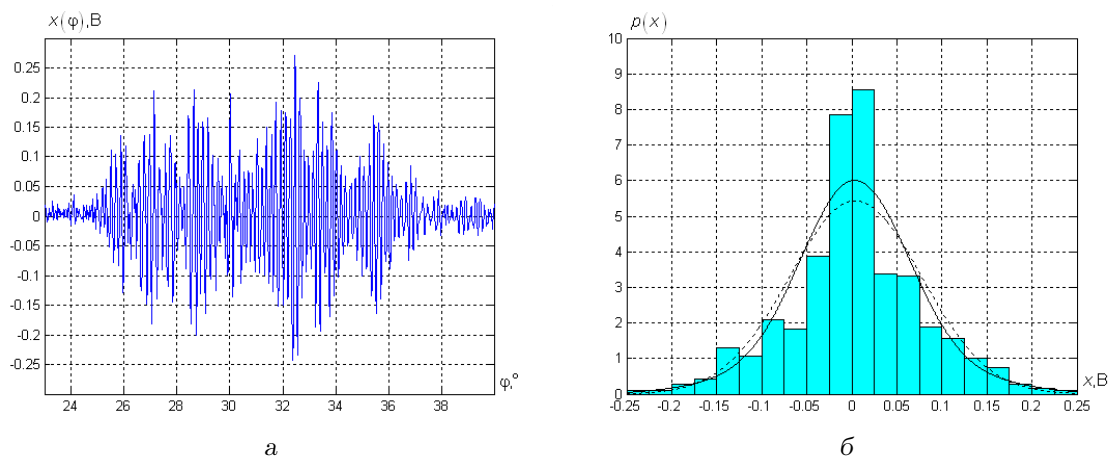


Рис. 7. Запис 2 [(23...40)°]:
а – фоноартрограма; б – відповідні щільності ймовірності й гістограма

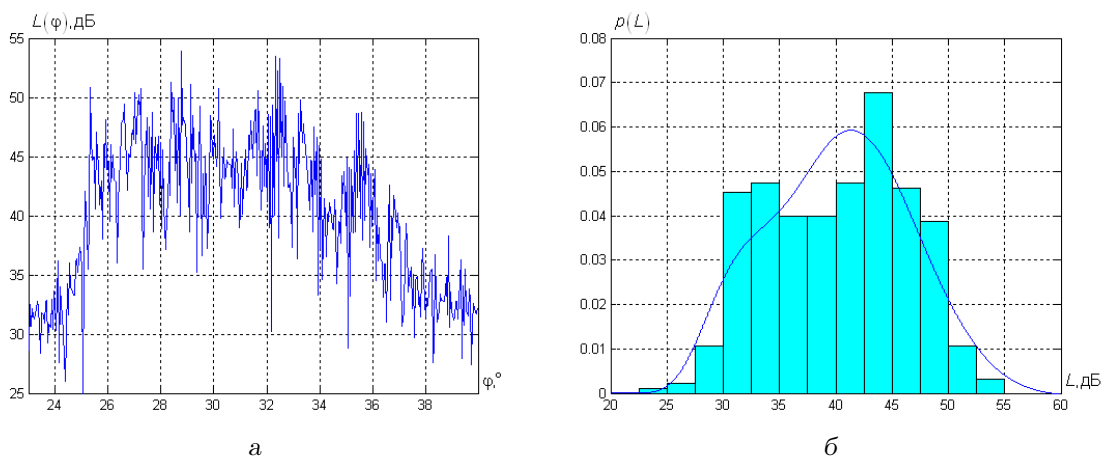


Рис. 8. Запис 2 [(23...40)°]:
а – рівні звукового тиску; б – відповідні щільність ймовірності й гістограма

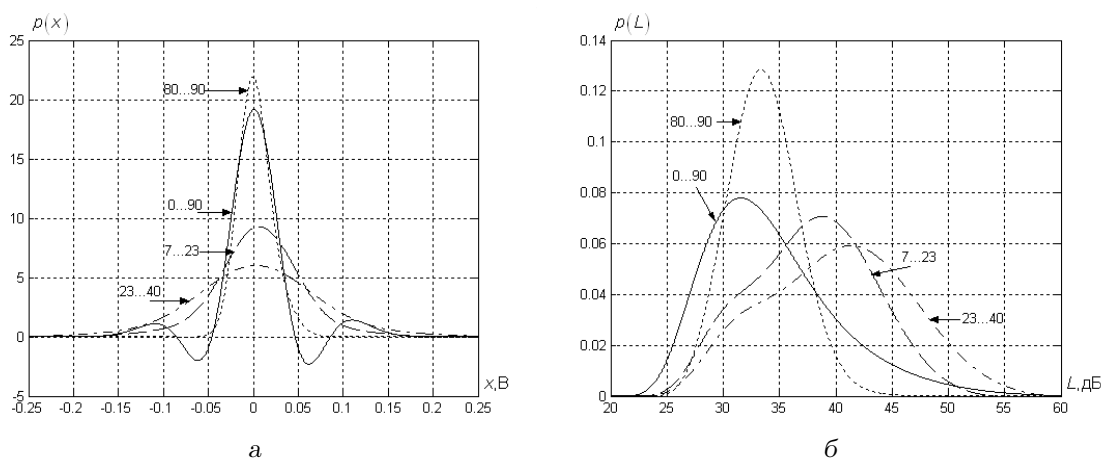


Рис. 9. Запис 2, порівняння щільностей ймовірності при різних кутах повороту:
а – для фоноартрограми; б – для рівнів звукового тиску

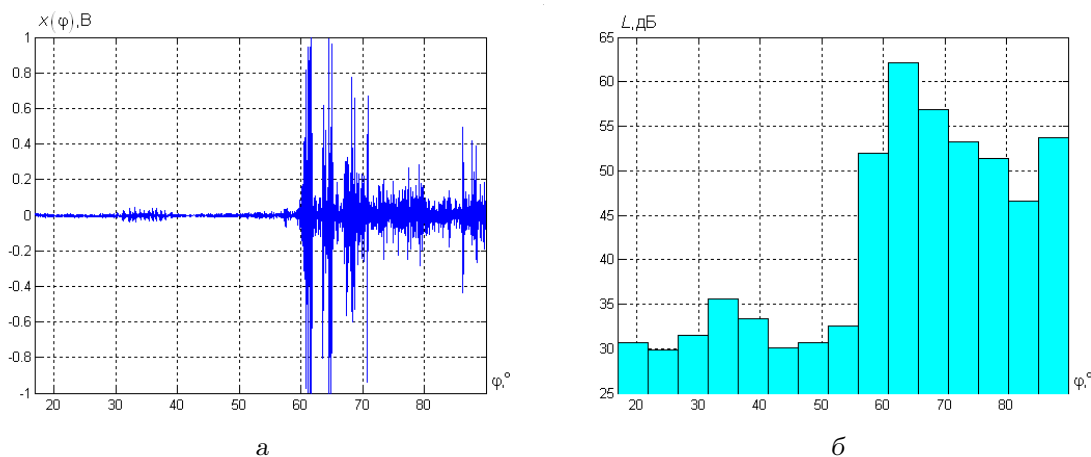


Рис. 10. Запис 3 (увесь діапазон кутів повороту):
а – фоноартрограма; б – середні рівні звукового тиску

Табл. 5. Числові характеристики для фоноартрограми запису 3

$\varphi, ^\circ$	17...90	30...40	50...59	59...72	72...85	85...90
$m, \text{В}$	-0.0007	-0.0022	-0.0016	-0.0005	0.0029	0.0034
$\sigma, \text{В}$	0.11784	0.0132	0.0107	0.2623	0.0707	0.0816
γ_3	0.0022	0.2400	-0.3292	0.0117	-0.0473	0.0810
γ_4	32.592	1.0326	4.5979	5.1140	2.4700	1.0525
γ_5	-6.5958	-0.0839	-14.2324	-0.0937	-0.7497	1.6654
γ_6	1477	-7.2743	49.0200	0.8991	8.9603	-1.5738

Табл. 6. Числові характеристики рівнів звукового тиску запису 3

$\varphi, ^\circ$	17...90	30...40	50...59	59...72	72...85	85...90
$m, \text{дБ}$	36.9831	30.8984	31.1239	47.4844	44.1292	46.1897
$\sigma, \text{дБ}$	9.3809	2.6347	2.9058	9.1536	5.5186	6.8702
γ_3	1.0454	0.1783	0.4277	0.2517	0.1942	0.7319
γ_4	0.3035	1.5077	4.9533	-0.7723	-0.3409	-0.0169
γ_5	-3.1214	1.4941	-0.3492	-1.2187	-0.2880	-2.3102
γ_6	-10.0329	-3.3841	26.2704	2.5784	1.0482	-5.2964

фоноартрограм для діапазонів $(17...90)^\circ$ (увесь діапазон руху), $(30...40)^\circ$ (імпульс типу “ромб”), $(50...59)^\circ$ (сукупність імпульсів невеликої амплітуди), $(59...72)^\circ$ (сукупність “кліків”), $(72...85)^\circ$ (“кліки” малої амплітуди на фоні “ромба”), $(85...90)^\circ$ (“кліки” середньої амплітуди на фоні “ромба”), а у табл. 6 – рівні звукового тиску для тих же діапазонів.

Як видно з табл. 5 (діапазони $(59...72)^\circ$ і $(85...90)^\circ$), для “кліків” притаманне значне зменшення кумулянтного коефіцієнта γ_6 для фоноар-

трограми, у тому числі і в порівнянні з нормою.

На рис. 11, а зображено відрізок фоноартрограми для $(59...72)^\circ$, а на рис. 11, б – щільність імовірності й гістограму для цього діапазону, а також графік щільності імовірності нормального розподілу (штрихова крива) з математичним сподіванням і дисперсією відрізка сигналу. На рис. 12, а зображено рівні звукового тиску в децибелах відрізка фоноартрограми для $(59...72)^\circ$, а на рис. 12, б – щільність імовірності і гістограму для цього діапазону. На рис. 13, а побудовані графіки щільностей

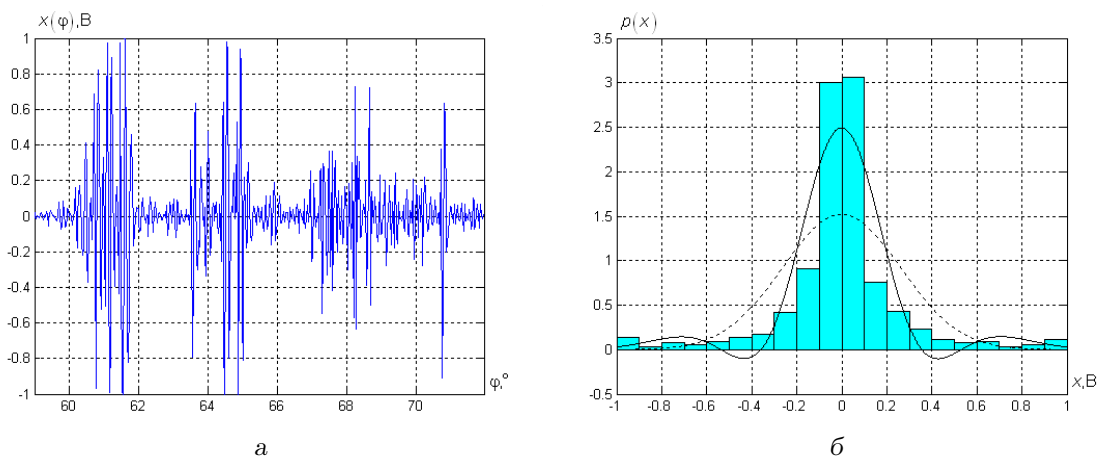


Рис. 11. Запис 3 [(59...72)°]:
 а – фоноартрограма; б – відповідні щільності ймовірності й гістограма

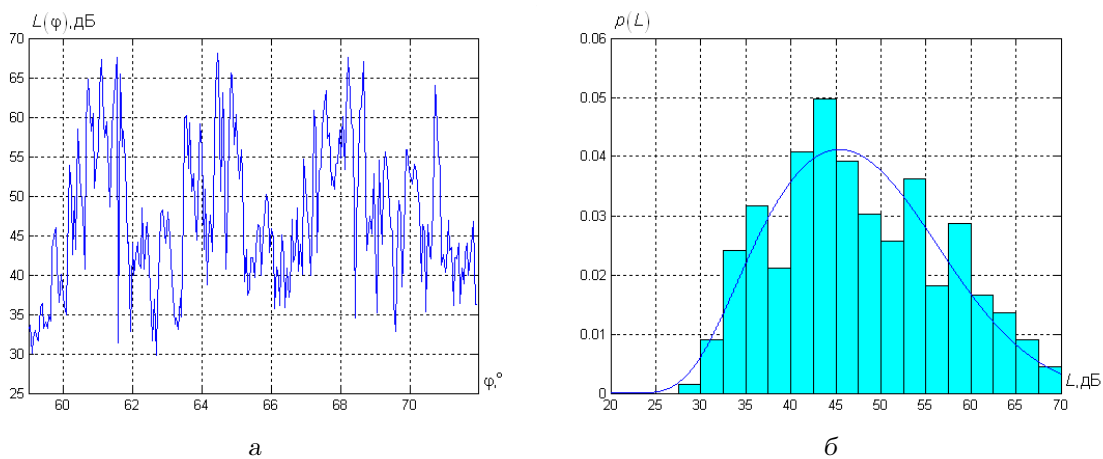


Рис. 12. Запис 3 [(59...72)°]:
 а – рівні звукового тиску; б – відповідні щільність ймовірності й гістограма

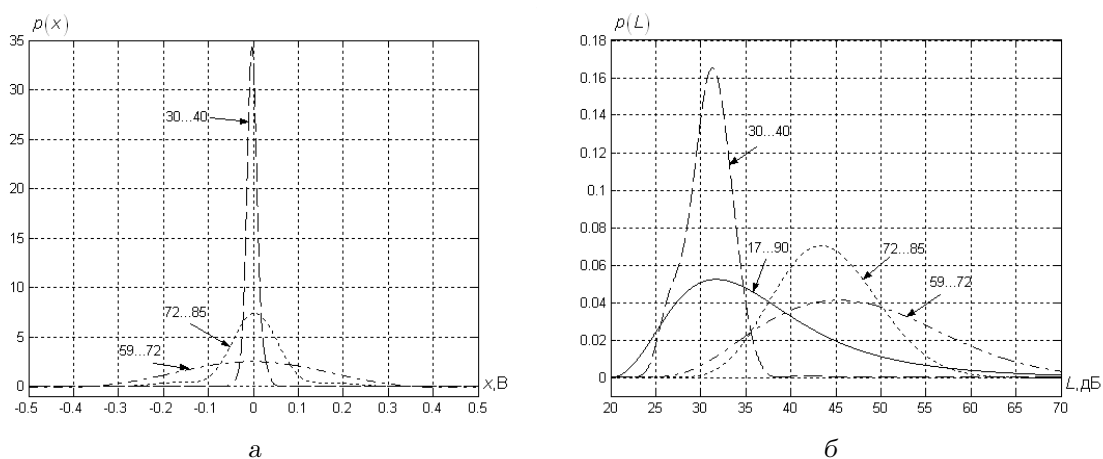


Рис. 13. Запис 3, порівняння щільностей ймовірності при різних кутах повороту:
 а – для фоноартрограми; б – для рівнів звукового тиску

Табл. 7. Старші кумулянтні коефіцієнти для повної тривалості записів

	1 – норма	2 – фібр. артроз	3 – деформ. артроз
γ_3	0.3787 ± 0.016 -0.4938 ± 0.05	0.3162 ± 0.011 0.8125 ± 0.051	0.0022 ± 0.024 1.0454 ± 0.052
γ_4	0.4345 ± 0.029 1.5343 ± 0.130	7.2665 ± 0.029 0.2358 ± 0.090	32.592 ± 0.100 0.3035 ± 0.075
γ_5	0.6951 ± 0.055 -2.5335 ± 0.390	1.9211 ± 0.044 -2.8607 ± 0.180	-6.5958 ± 0.310 -3.1214 ± 0.180
γ_6	3.2492 ± 0.150 8.1372 ± 0.740	68.7150 ± 0.160 -8.3084 ± 0.540	1477 ± 0.710 -10.0329 ± 0.470

імовірності фоноартрограм, а на рис. 13, б – графіки щільності ймовірності рівнів звукового тиску сигналу для діапазонів $(17 \dots 90)^\circ$, $(30 \dots 40)^\circ$, $(59 \dots 72)^\circ$, $(72 \dots 85)^\circ$.

Як видно з рис. 11 і 12, щільності ймовірності фоноартрограм достатньо добре описуються рядом Ерміта, а щільності ймовірності рівнів звукового тиску – рядом Лагерра. На рис. 13, а відсутня щільність імовірності для всього діапазону $(17 \dots 90)^\circ$ через значне зростання коефіцієнта ексцесу, викликаного появою “кліків” при наявності широкого кутового діапазону без імпульсів (що порушує умову невід’ємності).

3.4. Діагностичні ознаки (з аналізу відрізків фоноартрограм)

На основі розглянутих вище фоноартрограм встановлені такі діагностичні ознаки при аналізі відрізків фоноартрограм діапазонами по $(10 \dots 20)^\circ$.

1. *Норма.* Відзначається наявністю лише шуму електроакустичного тракту. Фоноартрограми лежать в межах ± 0.025 В, а рівні звукового тиску – в межах $(24 \dots 37)$ дБ. Коефіцієнт асиметрії рівнів звукового тиску – від’ємний.
2. *Фіброзний артроз.* Відзначається наявністю “ромбів” тривалістю близько 10° й амплітудою не більше 0.3 В. Кумулянтний коефіцієнт γ_6 фоноартрограми – від’ємний (табл. 3 для діапазонів $(7 \dots 23)^\circ$ і $(23 \dots 40)^\circ$).
3. *Деформуючий артроз.* Відзначається появою “кліків” амплітудою до 1 В. Кумулянтний коефіцієнт γ_6 фоноартрограми прямує до нуля і є для цього випадку найменшим з-поміж усіх досліджених фоноартрограм (табл. 5, діапазон $(59 \dots 72)^\circ$).

Зведемо в табл. 7 значення кумулянтних коефіцієнтів γ_k , $k=3,6$, для повної тривалості записів 1, 2, 3: для фоноартрограм (верхні рядки) й рівнів звукового тиску (нижні рядки). Як видно з таблиці, при наявності артрозу (2 і 3) для фоноартрограм коефіцієнти γ_4 і γ_6 суттєво зростають у порівнянні з нормою. Для рівнів звукового тиску коефіцієнт γ_3 стає додатнім і збільшується, γ_4 зменшується, γ_5 – від’ємний і зростає за модулем, γ_6 стає від’ємним і зростає за модулем у порівнянні з нормою.

Сказане дозволяє встановити характеристичні ознаки для проведення експрес-діагностики пацієнтів за критерієм “норма/патологія” при дослідженні повної тривалості фоноартрограми. При виявленні відхилень від норми необхідно проводити більш детальний аналіз фоноартрограм з розбиттям на інтервали меншої тривалості.

ВИСНОВКИ

Акустографічні методи, які полягають в аналізі шумів, що виникають у суглобі під час його руху, виявились найбільш придатними для ранньої діагностики стану колінних суглобів. Аналіз фоноартрограм здійснено як на повній їхній тривалості, так і по характерних діапазонах. Норма характеризується відсутністю виразних імпульсів, для фіброзного артрозу характерні імпульси типу “ромб”, для деформуючого артрозу – імпульси типу “клік”.

Кумулянтний аналіз для характерних секторів показав наступні результати:

- для норми коефіцієнт асиметрії рівнів звукового тиску – від’ємний;
- для фіброзного артрозу кумулянтний коефіцієнт γ_6 – від’ємний;
- для деформуючого артрозу кумулянтний коефіцієнт γ_6 прямує до нуля і є для цього най-

меншим з-поміж усіх досліджених фоноартрограм.

Кумулянтний аналіз для всієї тривалості записів показав, що при наявності артрозу:

- для фоноартрограм коефіцієнти γ_4 і γ_6 суттєво зростають у порівнянні з нормою;
- для рівнів звукового тиску γ_3 стає додатним і збільшується, γ_4 зменшується, γ_5 – від’ємний і зростає за модулем, γ_6 стає від’ємним і зростає за модулем у порівнянні з нормою.

За допомогою розвинення в ортогональні подання (для фоноартрограм – у ряд Ерміта, для рівнів звукового тиску – в ряд Лагерра) отримані відповідні оцінки щільності ймовірності, які при співставленні з гістограмами показали адекватність таких перетворень.

Усі щільності ймовірності фоноартрограм – симетричні. Для норми вони близькі до гауссівського розподілу й визначаються шумом апаратури. Для фіброзного артрозу вони мають більш гостру вершину, в порівнянні з гауссівською, що пояснюється появою імпульсів типу “ромб”. Для деформуючого артрозу – мають і більш гостру вершину й “затягнуті хвости”, що пояснюється появою імпульсів типу “клік”.

Щільності ймовірності рівнів звукового тиску для всієї тривалості записів мають такі особливості:

- для норми – нахил уліво (від’ємна асиметрія),
- для артрозів – нахил управо;
- для характерних секторів поява імпульсів призводить до значного розширення фронтів і більш симетричної щільності ймовірності.

1. Скляренко Є. Т. Травматологія і ортопедія: Підручник.– К.: Здоров’я, 2005.– 384 с.
2. Подрушняк Е. П., Каниболоцкая В. П. Артрозы.– К.: Здоров’я, 1977.– 112 с.
3. Герасименко С. И., Скляренко Е. Т., Полулях М. В., Гужевский И. В., Бабко А. Н., Черняк В. П. Ревматоидное поражение коленного сустава.– К.: ДГС Лтд, 2004.– 140 с.
4. Маркс В. О. Ортопедическая диагностика.– Мн.: Наука и техника, 1978.– 512 с.
5. Левенец В. Н., Пляцко В. В. Диагностика и лечение поврежденного суставного хряща коленного сустава: Учебное пособие.– М.: ЦИЛИУВ, 1987.– 26 с.
6. Букуп К. Клиническое исследование костей, суставов и мышц.– М.: Мед. лит., 2007.– 320 с.

7. Миронов С. П., Орлецкий А. К., Цыкунов М. Б. Повреждения связок коленного сустава.– М.: Лесар, 1999.– 208 с.
8. Бабко А. М. Комплексне ортопедичне лікування синовіту колінного суглоба у хворих на ревматоїдний артрит / Дис... канд. мед. наук – 14.01.21.– К.: Інститут травматології та ортопедії АМН України, 2002.– 168 с.
9. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход.– М.: Физматлит, 2007.– 440 с.
10. Moussavi Z. M. K., Rangayyan R. M., Bell G. D., Frank C. B., Ladly K. O., Zhang Y. T. Screening of vibroarthrographic signals via adaptive segmentation and linear prediction modeling // IEEE Trans. Biomed. Eng.– 1996.– **43**, № 1.– P. 15–23.
11. Krisnan S., Rangayyan R. M., Bell G. D., Frank C. B., Ladly K. O. Adaptive filtering, modeling and classification of knee joint vibroarthrographic signals for non-invasive diagnosis of articular cartilage pathology // Med. Biol. Eng. Comp.– 1997.– № 11.– P. 677–684.
12. Umaphathy K., Krisnan S. Modified Local Discriminant Bases and Its Applications In Signal Classification // Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Proces.– 2004, vol. 2.– P. 745–748.
13. Umaphathy K., Krisnan S. Modified local discriminant bases algorithm and its application in analysis of human knee joint vibration signals // IEEE Trans. Biomed. Eng.– 2006.– **53**, № 3.– P. 517–523.
14. Rangayyan R. M., Wu Y. F. Analysis of vibroarthrographic signals with features related to signal variability and radial-basis functions // Annals Biol. Eng.– 2009.– **37**, № 1.– P. 156–163.
15. Rangayyan R. M., Wu Y. F. Screening of knee-joint vibroarthrographic signals using statistical parameters and radial basis functions // Med. Biol. Eng. Comp.– 2008.– **46**, № 3.– P. 223–232.
16. Rangayyan R. M., Wu Y. F. Screening of knee-joint vibroarthrographic signals using probability density functions estimated with Parzen windows // Biomed. Signal Proces. Control.– 2010.– № 5.– P. 53–58.
17. Ясиновский М. А., Лузин Л. Л., Рашкович М. П., Волков А. А., Шкловский Б. И. Устройство для регистрации суставных звуков.– А.с. 304939 СССР, МКП А61В 5/05.– № 1279721/31–16 // Бюл. № 18, 04.06.71.– С. 6.
18. Ясиновский М. А., Лузин Л. Л., Рашкович М. П., Волков А. А., Шкловский Б. И. Новый метод диагностики суставных заболеваний – артрофонография // Клини. мед.– 1973.– № 7.– С. 25–28.
19. Горовецька Т. А., Красильников О. І., Подрушняк Є. П. Спосіб акустичної діагностики захворювань суглобів.– Пат. 35812 А Україна, МПК6 А61В5/02.– 23.10.98.
20. Горовецька Т. А., Красильников О. І., Макаренко А. К., Подрушняк Є. П. Акустична система для діагностики колінних суглобів.– Пат. 35813 А Україна, МПК6 А61В5/02.– 23.10.98.
21. Герасименко С. І., Бабко А. М. Застосування артрофонографії для діагностики уражень колінного суглоба // Ортопедія, травматологія і протезування.– 1998.– № 2.– С. 98–99.
22. Горовецька Т. А., Красильников А. И., Подрушняк Е. П. Возможности фоноартрографии для диагностики коленных суставов // Электроника и связь.– 2001.– № 12.– С. 60–65.

23. Рахмилевич А. Б., Чанцев А. В., Распопова Е. А. Возможности артрофонографии в диагностике и контроле лечения ранних форм гонартроза // Казан. наука.– 2010.– № 5.– С. С.187–194.
24. Кеңдалл М., Стьюарт А. Теория распределений.– М.: Наука, 1966.– 588 с.
25. Крамер Г. Математические методы статистики.– М.: Мир, 1975.– 684 с.
26. Деч Р. Нелинейные преобразования случайных процессов.– М.: Сов. радио, 1965.– 206 с.
27. Берегун В. С., Красильников О. И. Ортогональні подання щільності імовірностей флуктуаційних процесів. Стан проблеми // Електроніка і зв'язь.– 2007.– № 4(39).– С. 39–45.
28. Берегун В. С., Красильников О. И. Дослідження областей невід'ємності при ортогональних поданнях щільності імовірностей // Електроніка і зв'язь.– 2010.– № 3(56).– С. 73–78.