

М. О. Хвостівський<sup>1</sup>  
Г. І. Франчевська<sup>1</sup>

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ВЕЙВЛЕТ-ВИЯВЛЕННЯ ЕКГ-СИГНАЛІВ ПЛОДУ НА ТЛІ ЗАВАД

<sup>1</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

*Розглянуто одну з актуальних проблем сучасної пренатальної діагностики — виявлення ЕКГ-сигналу плоду на фоні домінуючого ЕКГ-сигналу матері та численних завад. Складність задачі зумовлена суттєвою різницею амплітудних рівнів між сигналами (співвідношення понад 3:1 на користь матері), їхньою квазіперіодичною природою, а також присутністю різноманітних артефактів: міогенних шумів, рухових перешкод, електромагнітних завад. Для адекватного опису процесів запропоновано математичну модель абдомінального ЕКГ-запису, яка враховує багатокomпонентність суміші сигналів, періодичність серцевої активності та адитивність шумів.*

*На основі моделі створено інтелектуальну систему виявлення, у якій реалізовано алгоритм вейвлет-обробки в базисі Морле. Такий підхід дозволяє здійснювати багаторівневий часово-частотний аналіз, ефективно пригнічувати низькочастотні складові материнського сигналу, підсилювати високочастотні QRS-комплекси плоду та забезпечувати стійкість до шумів. Алгоритмічне забезпечення системи включає послідовність етапів: введення змішаного сигналу, параметризацію масштабів і зсувів, обчислення вейвлет-коефіцієнтів, побудову 3D- та 2D-проекцій спектрального простору, а також статистичне прийняття рішення щодо наявності плодових компонент. Особливу увагу приділено детекції QRS-комплексів за амплітудно-часовими ознаками, що дозволяє виявляти регулярні ритмічні структури навіть у складних умовах.*

*Експериментальні дослідження, проведені у середовищі MATLAB, підтвердили ефективність методики: система здатна надійно виокремлювати ЕКГ-сигнал плоду в діапазоні частот 2—3 Гц (120—180 уд./хв) на фоні материнського сигналу із частотою 0,8—1,5 Гц (50—90 уд./хв). Запропонований підхід створює передумови для підвищення достовірності неінвазивного моніторингу серцевої діяльності плоду, зменшує ризики діагностичних помилок і може стати основою для систем інтелектуальної підтримки клінічних рішень у режимі реального часу.*

**Ключові слова:** інтелектуальна система, ЕКГ-сигнал плоду, ЕКГ-сигнал матері, завади, математична модель, алгоритм виявлення, вейвлет-перетворення, базис Морле, MATLAB.

### Вступ

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) [1], щороку у світі реєструється близько 2 мільйонів випадків пренатальної смертності, значна частина яких пов'язана з ускладненнями під час вагітності та пологів. Однією з провідних причин є несвоєчасна діагностика гіпоксії та порушень серцевої діяльності плоду. Тому розвиток методів неінвазивного моніторингу та своєчасного виявлення критичних станів є важливим завданням сучасної медицини.

Серед методів неінвазивного моніторингу особливе місце посідає електрокардіографія (ЕКГ), яка дозволяє отримати інформацію про частоту серцевих скорочень, ритм та особливості електричної активності серця. Проте виділення ЕКГ-сигналу плоду із суміші сигналів матері та зовнішніх завад залишається складною задачею, адже амплітуда сигналу у 3—100 разів менша за амплітуду ЕКГ-сигналу матері.

Важливим є те, що перш ніж здійснювати аналіз і діагностичну оцінку стану серця плоду, необхідно виявити сам факт присутності його ЕКГ-сигналу у суміші з сигналами матері та шумами. Без надійного виявлення корисного сигналу подальший аналіз (визначення частоти серцевих скорочень, варіабельності ритму, патологічних змін) втрачає достовірність. Саме тому задачі виявлення та локалізації плодових сигналів у зашумлених умовах є фундаментальним етапом обробки.

Протягом останніх десятиліть для виявлення ЕКГ-сигналу плоду на фоні ЕКГ-сигналу матері та

шумів запропоновано низку методів обробки для вирішення цієї проблеми: адаптаційні фільтри [2], метод незалежних компонент [3]—[5], методи сліпого виділення сигналів [6]—[10] та комбіновані підходи [11], [12], статистичний метод на основі критерію Неймана–Пірсона [13], метод глибинного навчання [14], нейронні мережі [15], поліноміальна декомпозиція власних значень [16]. Вони показали високу ефективність, проте мають спільний недолік — відсутність врахування флюктуаційних змін сигналів у різних часових масштабах, що є критично важливим для ранньої діагностики патологій.

#### Формулювання цілей статті

Ефективним рішенням є вейвлет-перетворення, яке дозволяє одночасно аналізувати сигнали у часовій та частотній областях. Використання базису Морле, що структурно відповідає природі ЕКГ-сигналів, забезпечує підвищену чутливість до локальних змін та стійкість до завад. Поєднання цього підходу з алгоритмічним і програмним забезпеченням у середовищі MATLAB дозволяє створити інтелектуальну систему — інструмент, здатний не лише автоматизувати виявлення та обробку сигналів, а й формувати аналітичні висновки для підтримки прийняття медичних рішень.

### Математична модель ЕКГ-сигналу плоду в утробі матері

Під час неінвазивної абдомінальної реєстрації ЕКГ-сигналу плоду (суміш сигналів плоду, матері та завад) поверхневі електроди, розташовані на передній черевній стінці матері, фіксують сумарний біоелектричний потенціал, що формується в результаті одночасної активності кількох джерел. Основними детермінованими складовими цієї суміші є ЕКГ-сигнал матері, ЕКГ-сигнал плоду; до них приєднуються різноманітні артефакти і шум (міогенні шуми від м'язів живота, рухові артефакти, електромагнітні перешкоди мережі, апаратний/електронний шум). У типовому абдомінальному записі ЕКГ-сигнал матері має значно більшу амплітуду та часто перекриває спектрально і часово слабший ЕКГ-сигнал плоду, тому задача однозначного виявлення та відновлення морфології сигналу плоду є нетривіальною [12].

На рис. 1 показана спрощена схема процесу реєстрації ЕКГ-плоду в утробі матері.

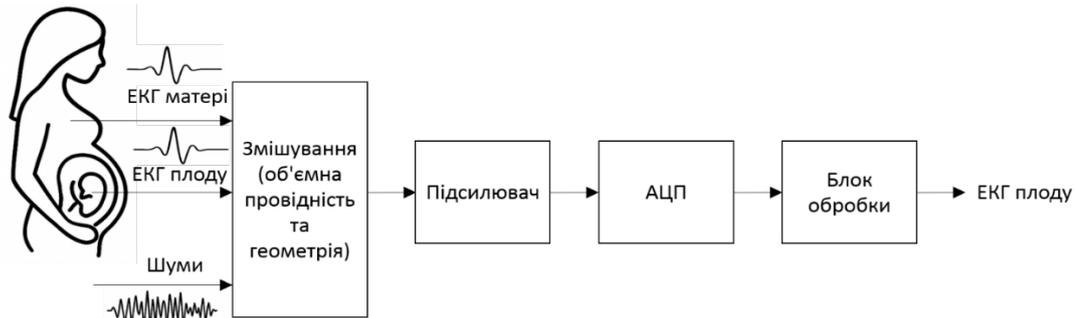


Рис. 1. Спрощена схема процесу реєстрації та виявлення ЕКГ-сигналу плоду

ЕКГ-сигнал матері має значно більшу амплітуду та домінує в суміші сигналів (сигнал плоду, сигнал матері, шуми (м'язові скорочення, рухи тіла чи електричні перешкоди з навколишнього середовища), тоді як сигнал плоду є набагато слабшим і частіше маскується ЕКГ-сигналом матері та різними шумами (міогенними, руховими, електромагнітними) [13]. Електроди, розташовані на передній черевній стінці, реєструють цю суміш змішаних сигналів. Отриманий сигнал надходить на підсилювач біопотенціалів, потім на АЦП та систему обробки, де застосовуються методи фільтрації, розділення та виявлення прихованого ЕКГ плоду.

На рис. 2 показано реалізацію суміші ЕКГ-сигналу плоду, ЕКГ-сигналу матері та завад.

ЕКГ-сигнал матері є домінантним сигналом у вимірюванні на черевних відведеннях: амплітуда в 5—10 разів вища, ніж у сигнал плоду. ЕКГ-сигнал плоду має значно меншу амплітуду на поверхні живота. Морфологія подібна до сигналу дорослої людини, але вища частота повторення (менші RR-інтервали). Шуми та артефакти включають: Baseline wander (0,15...0,5 Гц) — викликаний диханням і рухами; м'язова активність (ЕМГ-сигнал) — широкосмуговий шум; контактні шуми та апаратні перешкоди; імпульсні артефакти (рухи електродів).

Материнське та серце плоду працюють автономно. Це означає, що сигнали матері та плоду не є гармонічно пов'язаними сигналами, а два окремі процеси з власними періодами і формами QRS-комплексів. Електричні поля серця поширюються через провідне середовище (тіло матері, амніотична рідина).

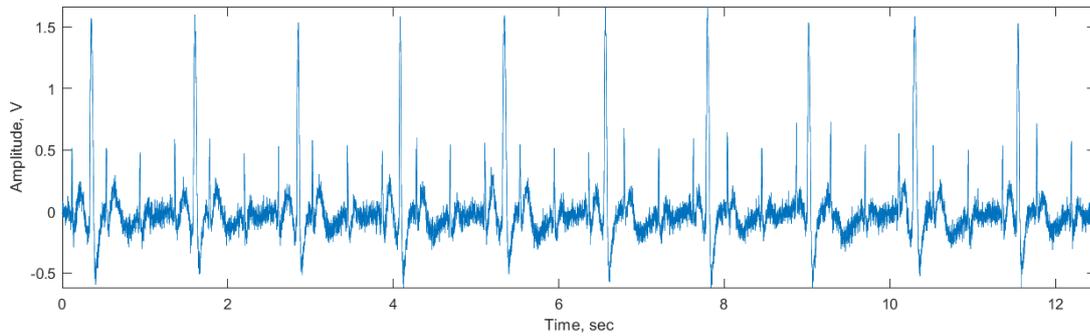


Рис. 2. Реалізація ЕКГ плоду у суміші ЕКГ матері та шумів

Отже, природньо модель ЕКГ-сигналу плоду повинна відображати багатокомпонентність, різний масштаб амплітуд, часову структуру та адитивність шумів згідно з виразом

$$\xi(t) = s_m(t) + s_f(t) + n(t), \quad (1)$$

де  $s_m(t)$  — ЕКГ-сигнал матері (корисний з погляду кардіомоніторингу матері, але перешкода для виділення ЕКГ-сигналу плоду);  $s_f(t)$  — ЕКГ-сигнал плоду (ціль для виявлення);  $n(t)$  — сумарний шум (артефакти, ЕМГ, дрейф).

Задачу виявлення присутності ЕКГ-сигналу плоду сформульовано через дві гіпотези:

$$\begin{aligned} H_0 : \xi(t) &= a_m s_m(t) + n(t); \\ H_1 : \xi(t) &= a_m s_m(t) + a_f s_f(t) + n(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Виявлення факту присутності  $s_f(t)$  — це задача перевірки гіпотез, оптимальний тест у гаусівському шумі.

### Метод вейвлет-виявлення ЕКГ-сигналів плоду на тлі завад

Інтелектуальна система для аналізу/обробки біомедичних сигналів повинна мати інструмент, здатний виявляти ( $H_0/H_1$ ) слабкі й нестационарні компоненти ЕКГ-сигналу плоду  $s_f(t)$  в складних сумішах  $\xi(t)$ .

Метод вейвлет-обробки добре підходить для задачі виявлення ЕКГ-сигналу плоду  $s_f(t)$  на фоні сигналу матері та шумів завдяки своїм особливостям роботи з нестационарними сигналами, до яких належить ЕКГ-сигнал.

На відміну від класичного перетворення Фур'є, яке дає лише глобальний спектр, вейвлет-перетворення дозволяє одночасно аналізувати сигнал у часовій та частотній областях. Це критично важливо для ЕКГ-сигналів, оскільки серцеві комплекси (QRS, P, T) мають чіткі часові обмеження та різну енергетичну концентрацію.

Вейвлети дають змогу розкласти суміш сигналів на підсмуги, де ЕКГ-сигнал матері та ЕКГ-сигнал плоду проявляються з різною інтенсивністю.

Вейвлет-перетворення особливо чутливе до швидких змін ЕКГ-сигналу. QRS-комплекс плоду, хоч і малий за амплітудою, має круті фронти, що добре проявляються на певних рівнях вейвлет-розкладу. Це дозволяє:

- придушити низькочастотний компонент ЕКГ-сигналу матері (P і T хвилі матері та її базову лінію),
- підсилити високочастотні QRS-комплекси ЕКГ-сигналу плоду,
- застосувати порогову обробку для виділення піків ЕКГ-сигналу плоду.

Вейвлет-перетворення дає набір коефіцієнтів [17]

$$W_\xi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (3)$$

де  $\psi(t)$  — базисна функція,  $a$  — масштаб,  $b$  — зсув.

На масштабах, що відповідають частотному діапазону сигналу, коефіцієнти  $W_\xi(a, b)$  проявля-

ють регулярні пікові структури в моменти серцевих скорочень плоду. Їхня наявність у записі свідчить про присутність ЕКГ-сигналу плоду.

ЕКГ-сигнали плоду мають ритмічний характер і складаються з коротких швидких комплексів (QRS) з чітко вираженим частотним спектром. Базис Морле добре узгоджується з такими коливальними структурами, бо він сам є короткою хвилею з гармонічним заповненням. Це дозволяє «підлаштуватися» до QRS-комплексів, завдяки чому вони легко помітні у коефіцієнтах вейвлет-перетворення.

Вейвлет Морле визначається як гармонічна хвиля, локалізована гаусовою обвідною

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{j\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (4)$$

Вейвлет-обробка в базисі Морле  $\psi(t)$  добре підходить для виявлення ЕКГ плоду, оскільки:

- відтворює коливальний характер QRS-комплексів;
- забезпечує одночасну локалізацію у часі та частоті;
- дозволяє розрізнити компоненти матері, плоду та шуми;
- підвищує чутливість до слабких, але ритмічних сигналів плоду.

Вейвлет обробка в базисі Морле для дискретного ЕКГ-сигналу  $\xi[n]$  з кроком  $\Delta t$  має вигляд з урахуванням формул (3) та (4)

$$W_{\xi}(a, b) \approx \frac{\pi^{-\frac{1}{4}}}{\sqrt{a}} \sum_{n=0}^{N-1} \xi[n] e^{-j\omega_0 \frac{n\Delta t - b}{a}} e^{-\frac{\left(\frac{n\Delta t - b}{a}\right)^2}{2a^2}} \Delta t, \quad (5)$$

де  $n$  — номер відліку дискретного сигналу,  $n = 0, N - 1$ ;  $\Delta t$  — крок дискретизації.

Таким чином, використання вейвлета Морле як базису створює умови для ефективного виявлення навіть слабого за рівнем ЕКГ-сигналу плоду на фоні сильного сигналу матері та завад.

Отже, метод вейвлет-виявлення в базисі Морле — це не просто математичний інструмент, а базова функціональна ланка інтелектуальної системи для ефективного виявлення навіть низького за рівнем ЕКГ-сигналу плоду на фоні сильного материнського сигналу та завад.

У структурі інтелектуальної системи метод вейвлет виконує такі функції:

- попередній аналіз: розкладання сигналу на часово-частотні складові;
- виявлення ознак: ідентифікація регулярних максимумів коефіцієнтів Морле, що відповідають QRS-комплексам плоду;
- передача далі: результати аналізу використовуються для навчання класифікаторів, побудови шаблонів або підтвердження присутності ознак плоду у записі ЕКГ-сигналу;

Таким чином, вейвлет-обробка в базисі Морле — це ядро механізму розпізнавання в інтелектуальній системі, яке забезпечує виділення прихованого корисного сигналу плоду на фоні потужного сигналу матері та шумів.

### Алгоритм роботи інтелектуальної системи виявлення ЕКГ-сигналу плоду

Узагальнена послідовність роботи інтелектуальної системи виявлення ЕКГ-сигналу плоду на фоні ЕКГ-сигналу матерів та шумів показана на рис. 3.

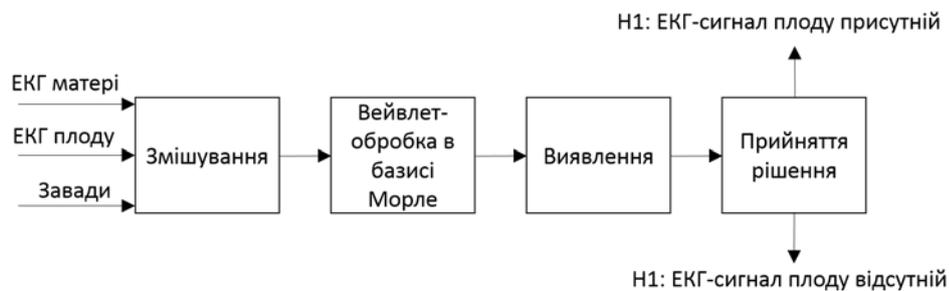


Рис. 3. Узагальнена послідовність роботи інтелектуальної системи виявлення ЕКГ-сигналу плоду

Послідовність роботи інтелектуальної системи виявлення ЕКГ-сигналу плоду (рис. 3) полягає в тому, що спочатку з поверхні живота вагітної жінки знімається суміш сигналів, яка містить слаб-

кий ЕКГ-сигнал плоду, домінуючий ЕКГ-сигнал матері та різні шуми, після чого ця суміш обробляється за допомогою вейвлет-перетворення на базисі Морле для виділення характерних високо-частотних компонент плоду та пригнічення материнського сигналу і шумів, далі здійснюється детекція QRS-комплексів плоду на основі амплітудно-часових характеристик і порогових критеріїв, а на завершальному етапі виконується прийняття рішення шляхом оцінки частоти серцевих скорочень плоду, регулярності ритму та можливих відхилень, що дозволяє сформулювати медично значимий висновок про стан серцевої діяльності.

На рис. 4 показано розширений алгоритм роботи інтелектуальної системи вейвлет-виявлення ЕКГ-сигналу плоду.

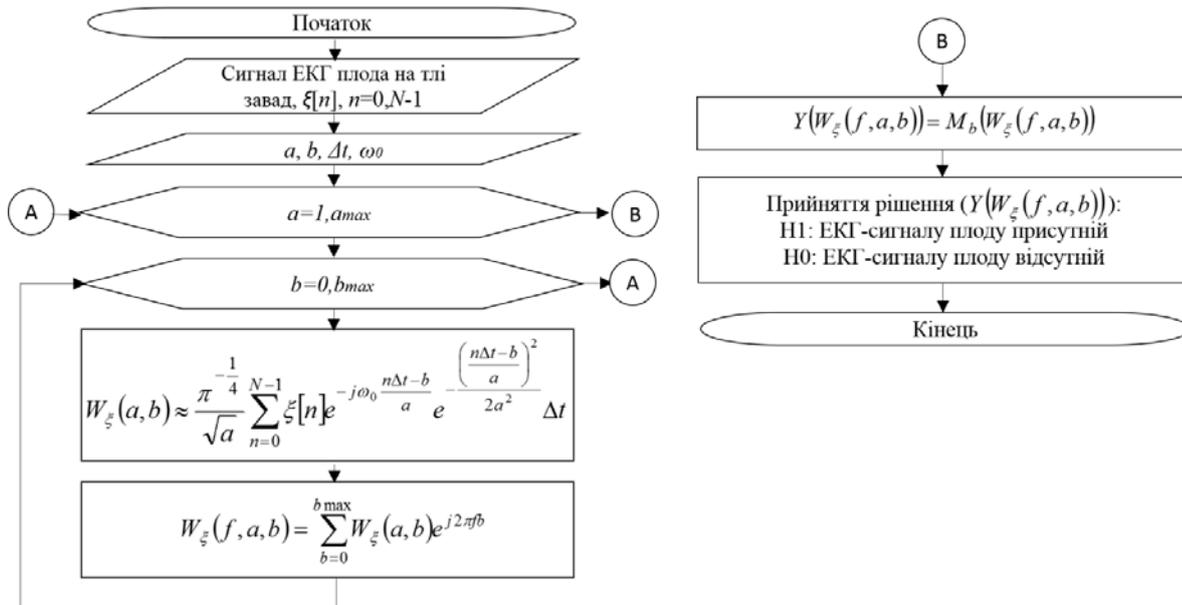


Рис. 4. Алгоритм роботи інтелектуальної системи вейвлет-виявлення ЕКГ-сигналу плоду з використанням базису Морле

Алгоритм інтелектуальної системи вейвлет-виявлення ЕКГ-сигналу плоду в базисі Морле реалізує послідовність етапів, спрямованих на виявлення характерних компонент фетального сигналу.

На початковому етапі здійснюється введення вхідного сигналу, який є сумішшю ЕКГ-сигналу плоду, ЕКГ-сигналу матері та шумових завад.

Далі виконується параметризація аналізу, що передбачає визначення діапазону масштабів  $a \in [1, a_{\max}]$  та часових зсувів  $b \in [0, b_{\max}]$ .

Подальшим кроком є обчислення коефіцієнтів вейвлет-перетворення  $W_{\xi}(a, b)$  для кожної пари параметрів  $a$  та  $b$ , що забезпечує часово-частотну декомпозицію сигналу.

Після цього формується спектральне подання  $W_{\xi}(f, a, b)$ , яке відображає розподіл енергії сигналу в масштабно-частотному просторі.

Подальша обробка передбачає обчислення агрегованої характеристики  $Y(W_{\xi}(f, a, b))$ , яка концентрує інформативні ознаки, необхідні для прийняття рішення.

Завершальний етап полягає у застосуванні статистичного критерію для вибору між двома гіпотезами:  $H_1$  — наявність ЕКГ-сигналу плоду;  $H_0$  — відсутність ЕКГ-сигналу плоду.

### Результати експериментального виявлення ЕКГ-сигналу плоду

На рис. 5 показано результат вейвлет-виявлення ЕКГ-сигналу плоду у суміші з ЕКГ-сигналом матері та шумами у вигляді 3D зображення (3D компонент).

У результаті вейвлет-обробки ЕКГ-сигналів отримано 3D-спектр, що відображає просторово-часовий розподіл енергетичних складових у координатах «зсув – масштаб – спектральний рівень». Аналіз продемонстрував, що компоненти ЕКГ-сигналу матері формуються у діапазоні масштабів 0—5 зі зсувами 0—10000, де амплітудні піки досягають значень  $2,5 \cdot 10^{-3}$  В. Це відповідає характерним частотам серцевої активності матері у межах 0,8...1,5 Гц (частота серцевих скорочень близько 50...90 уд./хв). Натомість ЕКГ-сигнал плоду виявляється у діапазоні масштабів 5—25 зі зсувами 0—10000, де зафіксовані регулярні хвильові структури зі спектральною амплітудою порядку

$0,5 \cdot 10^{-3}$  В, що відповідає частотному діапазону 2...3 Гц (серцева діяльність плоду 120...180 уд./хв). Співвідношення амплітуд становить понад 3:1 на користь материнського сигналу, що пояснює необхідність використання складних методів відокремлення.

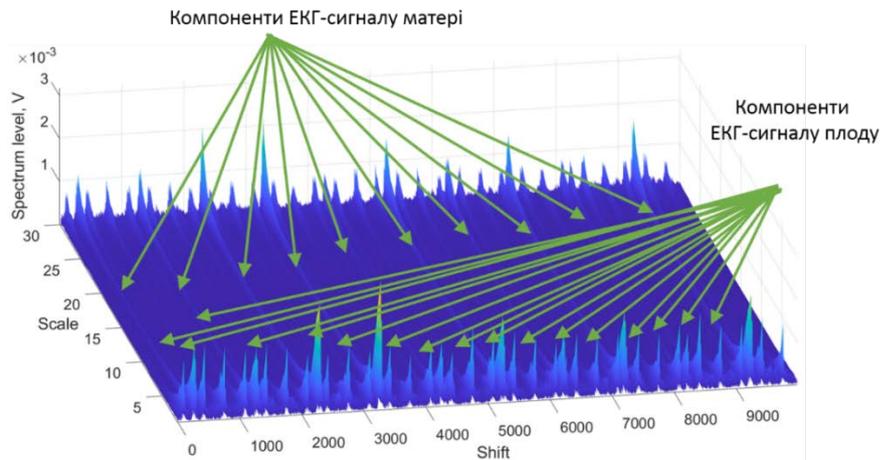


Рис. 5. 3D вейвлет-компоненти ЕКГ-сигналу плоду та ЕКГ-сигналу матері

Застосована інтелектуальна система ґрунтується на багаторівневому вейвлет-розкладі з автоматизованою ідентифікацією спектральних ознак, що дозволяє не лише розділити материнський та плодовий ЕКГ-сигнали, але й адаптивно виділяти слабкі компоненти плоду у присутності потужних завад і шумів. Завдяки поєднанню алгоритмів часово-частотного аналізу та машинного прийняття рішень забезпечується підвищена точність неінвазивного моніторингу серцевої активності плоду, що має суттєве значення для клінічної діагностики та прогнозування акушерських ускладнень.

У задачі виявлення плодової електрокардіограми на фоні материнського сигналу та шумів ключове значення має не лише якісна візуалізація тривимірного вейвлет-спектра, але й кількісно-якісне оцінювання його компонент. Тривимірне представлення «зсув – масштаб – енергія» дозволяє ідентифікувати локалізацію енергетичних максимумів, проте для об'єктивного аналізу та автоматизованої обробки необхідно переходити до двовимірних усереднених компонент, що будуться за використання згортки (усереднення) по зсуву часу

$$\hat{Y}(a) = M_b \{W(a, b)\}. \quad (6)$$

Таким чином, визначення 2D-проекції усереднених компонент дозволяє оцінювати внесок сигналів у різних масштабах без прив'язки до конкретного моменту часу.

Інтелектуальна система використовує саме цей підхід: 3D-вейвлет простір застосовується для виявлення ЕКГ-сигналів у часово-частотному розподілі, тоді як 2D усереднені оцінки забезпечують кількісне виділення стабільних спектральних ознак плоду, що дозволяє підвищити достовірність діагностики та мінімізувати вплив шумових артефактів.

На рис. 6 показано результат усередненої оцінки вейвлет-компонент за часовими зсувами, що відображає інтегральний спектральний розподіл сигналу після 3D-вейвлет обробки.



Рис. 6. Усередненні 3D коефіцієнти вейвлет

Це дозволяє перейти від багатовимірної часово-частотної структури до зрозумілого 2D-представлення, де добре виокремлюються компоненти ЕКГ-сигналів матері та плоду.

Компоненти ЕКГ-сигналу матері (позначені «А») мають більшу амплітуду (до  $4,5 \cdot 10^{-4}$  В) і формують періодичні виражені піки у діапазонах зсувів приблизно 0...500, 2000...2500, 3000...3500, 4500...5000, 6000...6500, 7000...7500 та 9000...9500. Це відповідає нижчій частоті серцевого ритму матері ( $\approx 0,8...1,5$  Гц або 50...90 уд./хв), яка у спектрі проявляється стабільними високими піками.

Компоненти ЕКГ-сигналу плоду (позначені «В») мають меншу амплітуду ( $\approx 1,0 \cdot 10^{-4}$  В), але розташовуються частіше — між материнськими комплексами, із більшою кількістю піків у межах одного інтервалу часу. Це відповідає вищій частоті серцевих скорочень плода ( $\approx 2...3$  Гц або 120...180 уд./хв).

Таким чином, усереднення вейвлет-компонент дозволило чітко виділити дві групи сигналів: високі та рідкі материнські піки і нижчі, але регулярніші плоду. Це підтверджує ефективність методики: у 3D вейвлет-просторі відокремлені складові матері та плоду, а перехід до 2D усереднених оцінок на основі запропонованих характеристик уможливив кількісне зіставлення та автоматизоване виявлення ЕКГ-сигналу плоду на фоні сильнішого сигналу матері і шумів.

### Висновки

Отримані результати вейвлет-обробки свідчать, що інтелектуальна система виявлення ЕКГ-сигналу плоду функціонує на основі двовимірного перетворення з використанням базису Морле, після чого здійснюється усереднення вейвлет-коефіцієнтів за часовими зсувами. На виході така система формує усереднені 2D вейвлети, які є інформативним відображенням динаміки амплітудних змін у заданих діапазонах масштабів, відповідних частотним характеристикам серцевої активності плоду. Використання цього підходу дозволяє ефективно пригнічувати потужні компоненти материнського ЕКГ-сигналу та фонових шумів, залишаючи виражені періодичні структури, що корелюють із частотою серцевих скорочень плода (близько 2...3 Гц). Саме 2D усереднені вейвлети виступають ключовим детекційним критерієм для автоматичного виділення піків плоду, які відображають електрокардіографічну активність плоду. Таким чином, система забезпечує надійне виявлення слабкого ЕКГ-сигналу плоду на фоні ЕКГ-сигналу матері, що домінує, та завад. Це створює підґрунтя для підвищення достовірності неінвазивного моніторингу стану плода в реальному часі.

Загалом, наукова новизна праці полягає у розробці інтелектуальної системи виявлення ЕКГ-сигналу плоду, в якій вперше поєднано математичну модель мультикомпонентної адитивної суміші біосигналів з реалізацією вейвлет-обробки в базисі Морле та двоетапним спектральним поданням 3D–2D проєкцій коефіцієнтів вейвлет, що забезпечило підвищення чутливості та стійкості процесу автоматизованого виявлення сигналу плоду на фоні сигналу матері та шумових артефактів, створюючи підґрунтя для надійного неінвазивного моніторингу серцевої діяльності плоду.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *World Health Organization, Newborn mortality*. [Online]. Updated Mar. 14, 2024. Available: <https://www.who.int>. Accessed: Sep. 5, 2025.
- [2] B. Widrow, and S. D. Stearns, "Adaptive Signal Processing. Englewood Cliffs," NJ, Prentice-Hall, p. 491, 1985.
- [3] A. Cichocki, and S. Amari, *Adaptive Blind Signal and Image Processing: Learning Algorithms and Applications*. New York, NY: Wiley, 2002, p. 565. <https://doi.org/10.1002/0470845899>.
- [4] T.-W. Lee, *Independent Component Analysis: Theory and Applications*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1998, p. 250. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2851-4>.
- [5] В. І. Шульгін, і В. В. Федотенко, «Виділення електрокардіограми плода з багатоканального абдомінального сигналу в реальному масштабі часу.» *IV Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи та технології в медицині» (ICM–2021)*: зб. наук. пр., Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021, с. 122-123. ISBN 978-966-662-842-1.
- [6] A. Hyvärinen, *Independent Component Analysis*. New York, NY: Springer, 2001, p. 495.
- [7] P. Comon, "Independent component analysis – a new concept?" *Signal Processing*, vol. 36, no. 3, pp. 287-314, 1994, [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0165-1684(94)90029-9).
- [8] J.-F. Cardoso, "Blind signal separation: statistical principles," *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 10, pp. 2009-2025, 1999.
- [9] Т. О. Білобородова, і І. С. Скарга-Бандурова, «Розділення джерел даних і вилучення цільових компонентів електрофізіологічних часових рядів на прикладі ЕКГ плоду.» *Регстрація, зберігання і обробка даних*, т. 25, с. 43-53, 2023. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2023.25.1.287017>.
- [10] R. Martinek, et all., "Comparative effectiveness of ICA and PCA in extraction of fetal ECG from abdominal signals: Toward non-invasive fetal monitoring." *Frontiers in Physiology*, vol. 9, p. 648, May 30, 2018, <https://doi.org/0.3389/fphys.2018.00648>.

- [11] V. Zarzoso, and A. K. Nandi, "Noninvasive fetal electrocardiogram extraction: Blind separation versus adaptive noise cancellation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 48, no. 1, pp. 12-18, 2001, <https://doi.org/10.1109/10.900244>.
- [12] R. Sameni, and G. D. Clifford, "A review of fetal ECG signal processing: issues and promising directions," *Open Pac-ing Electrophysiol. Ther. J.*, vol. 3, pp. 4-20, 2010, <https://doi.org/10.2174/1876536X01003010004>.
- [13] М. О. Хвостівський, і Є. Б. Яворська, «Метод виявлення електрокардіосигналу плоду в утробі матері у суміші із завадами.» *Вісник Хмельницького національного технологічного університету*, № 3, с. 179-184, 2011.
- [14] M. Wahbah, et al., "A deep learning framework for noninvasive fetal ECG signal extraction," *Frontiers in Physiology*, vol. 15, Apr. 2024, Art. no. 1329313, <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1329313>.
- [15] L. Chen, S. Wu, and Z. Zhou, "Fetal ECG signal extraction from maternal abdominal ECG signals using Attention R2W-Net," *Sensors*, vol. 25, no. 3, p. 601, Jan. 2025, <https://doi.org/10.3390/s25030601>.
- [16] S. Redif, "Fetal electrocardiogram estimation using polynomial eigenvalue decomposition," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 24, no. 4, pp. 2483-2497, 2016, <https://doi.org/10.3906/elk-1401-19>.
- [17] I. V. Yavorskyi, S. V. Uniyat, R. A. Tkachuk, and M. O. Khvostivskyi, "Algorithmic support of wavelet processing of pulse signals in the Morlet basis," in *Mathematics and Mathematical Simulation in a Modern Technical University: Proc. II Int. Sci. Pract. Conf. for Students and Young Scientists*, Lutsk, Ukraine, Apr. 30, 2024, pp. 51-53. ISBN 978-966-377-250-9.

Рекомендована кафедрою біомедичної інженерії та оптико-електронних систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.09.2025

**Хвостівський Микола Орестович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри біотехнічних систем, e-mail: hvostivskyu@tntu.edu.ua ;

**Франчевська Галина Іванівна** — аспірантка кафедри біотехнічних систем, e-mail: franchevska.halynaa@gmail.com .

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль

**M. O. Khvostivskyi<sup>1</sup>**

**H. I. Franchevska<sup>1</sup>**

## Intelligent Wavelet Detection System of Fetal ECG Signals Against the Background of Interference

<sup>1</sup>Ternopil Ivan Puluj National Technical University

*The article considers one of the urgent problems of modern perinatal diagnostics — the detection of the fetal ECG signal against the background of the dominant maternal ECG signal and numerous interferences. The complexity of the problem is due to the significant difference in amplitude levels between the signals (the ratio is more than 3:1 in favor of the mother), their quasi-periodic nature, as well as the presence of various artifacts: myogenic noise, motion interference, and electro-magnetic interference. For an adequate description of the processes, a mathematical model of the abdominal ECG recording is proposed, which takes into account the multicomponent nature of the signal mixture, the periodicity of cardiac activity, and the additivity of noise.*

*Based on the model, intelligent detection system was created, in which the wavelet processing algorithm in the Morlet basis is implemented. This approach allows for multilevel time-frequency analysis, effectively suppressing low-frequency components of the maternal signal, amplifying high-frequency QRS complexes of the fetus, and ensuring noise immunity. The algorithmic support of the system includes a sequence of stages: input of a mixed signal, parameterization of scales and shifts, calculation of wavelet coefficients, construction of 3D and 2D projections of the spectral space, and statistical decision-making regarding the presence of fetal components. Particular attention is paid to the detection of QRS complexes by amplitude-temporal features, which enables to detect regular rhythmic structures even in difficult conditions.*

*Experimental studies conducted in the MATLAB environment confirmed the effectiveness of the method: the system can reliably distinguish the fetal ECG signal in the frequency range of 2...3 Hz (120...180 beats/min) against the background of the maternal signal with a frequency of 0.8...1.5 Hz (50...90 beats/min). The proposed approach creates the prerequisites for increasing the reliability of non-invasive fetal cardiac monitoring, reduces the risks of diagnostic errors, and can become the basis for intelligent support systems for clinical decisions in real time.*

**Keywords:** intelligent system, fetal ECG signal, maternal ECG signal, interference, mathematical model, detection algorithm, wavelet transform, Morlet basis, MATLAB.

**Khvostivskyi Mykola O.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Biotechnical Systems, e-mail: hvostivskyu@tntu.edu.ua ;

**Franchevska Halyna I.** — Post-Graduate Student, of the Chair of Biotechnical Systems, e-mail: Franchevska.halynaa@gmail.com