

Використання нейромереж та алгоритмів штучного інтелекту для діагностування сторонніх тіл у рановому каналі пацієнтів

О. Ф. Саленко¹ - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5685-6225>

В. А. Черняк² - ORCID <https://orcid.org/0009-0005-5280-542X>

В. М. Орел³ - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8775-3253>

Б. О. Саленко⁴ - ORCID <https://orcid.org/0009-0004-4026-6767>

Received: 14 November 2025 / Revised: 6 December 2025 / Accepted: 2 February 2026

Анотація: В роботі розглядається прилад, в якому отримання інформації щодо наявності у рані стороннього тіла – осколка здійснюється за рахунок використання спеціального компактного датчику; механічний пружний гнучкий стрижень, який укладається в захисну м'яку трубку і з'єднаний з герметичною камерою, однією зі стінок якої є мембрана, здатна перетворювати коливання стрижня в звукові хвилі, які, поширюючись в камері, реєструються мікрофоном. Змонтований в зручному корпусі, датчик підключається до фільтрів звукової частоти (до 15 кГц) через підсилювальну ланку, і дає змогу отримати шумовий сигнал, на основі якого можна зафіксувати контакт стержня з чужорідним тілом під час його руху в рані пацієнта. Відмінність картин спектру дає змогу вважати, що за допомогою такого приладу можна не тільки виявляти сторонні тіла, а і виконувати їх ідентифікацію.

Застосування нейромереж і алгоритмів штучного інтелекту дозволяє значно підвищити точність детекції стороннього тіла, особливо малих розмірів та таких, реологічні властивості яких мало відрізняються від тканини пацієнта. Так, наразі при відповідному налагодженні приладу точність діагностики сторонніх тіл становить до 65...95 % для тіл з розмірами понад 3,5...5,0 мм. Вища точність спостерігається при виявленні тіл із вираженими пружними властивостями.

Показано, що використання даного приладу дозволяє отримати інформацію про наявність стороннього тіла (внаслідок появи окремих чітко виявлених піків сигналу), у тому числі, й про його тип. Форма картини шумової емісії також дає змогу оцінити приблизний розмір тіла.

Ключові слова: засоби діагностики поранень, сторонні тіла, шумова емісія, нейромережі та штучний інтелект, детермінація.

Вступ та актуальність

Відсутність достатньої кількості діагностичних засобів знижує ефективність відповідної медичної допомоги [1] при осколкових мінно-вибухових та кульових поранень.

Найпоширенішими методами виявлення осколків в організмі людини є рентгенологічні методи, МРТ, метод пошуку за допомогою магніту, ультразвукове дослідження, метод прямого спостереження. Однак ці методи мають як свої переваги, так і недоліки. Найчастіше труднощі з пошуком осколків виникають, якщо осколок не є рентгенконтрастним і не має магнітних властивостей. Рентгеновські промені можуть пропустити до 25 % скляних і 93 % сторонній тіл (СТ) з деревини [2]. Останнім часом набув поширення магнітопошуковий метод [3], з вилученням СТ з рани невідомими магнітами, з розривним навантаженням 100–150 кг (при глибокому проникненні – до 200...300 кг). Крім того, при певних осколкових пораненнях деякі види діагностики протипоказані, а деякі взагалі не можуть виявити осколки в тілі людини. З цих позицій актуальним і надзвичайно важливим завданням сьогодення є пошук простих і надійних засобів діагностики СТ в організмі пораненого (без використання рентгеновських апаратів, складних систем МРТ), вирішення якої доз-

¹ Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, <https://ror.org/00syn5v21>

² Національний університет України ім. Т. Г. Шевченка, Київ, Україна, <https://ror.org/02aaqv166>

³ Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, Кременчук, Україна, <https://ror.org/02pkshz09>

⁴ Національний університет “Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка”, Полтава, Україна, <https://ror.org/0554d9k40>

✉ О. Ф. Саленко
salenko2006@gmail.com



воляє встановити факт наявності стороннього тіла та оцінити його фізико-механічні характеристики, що сприяє визначенню ранньої тактики лікування.

У якості засобу отримання інформації розглядається використання спеціального компактного датчику для діагностики наявності твердих квазіпружних тіл у в'язкому середовищі – тілі пацієнта. Він являє собою механічний пружний гнучкий стрижень, який укладається в захисну м'яку трубку і з'єднаний з герметичною камерою. Однією зі стінок камери є мембрана, здатна перетворювати коливання стрижня в звукові хвилі, які, поширюючись в камері, реєструються мікрофоном. Змонтований в зручному корпусі, датчик підключається до фільтрів звукової частоти (до 15 кГц) через підсилювальну ланку. Це дозволяє отримати придатний до ідентифікації шумовий сигнал, на основі якого можна встановити контакт стержня з чужорідним тілом під час його руху в рані пацієнта. Відмінності у сигналі, що виражаються у відповідних картинах спектру, дозволяють припустити придатність цього параметру для ідентифікації сторонніх тіл [4].

Мета та завдання дослідження

Основною метою роботи є покращення точності ідентифікації сторонніх тіл у ранових каналах пацієнтів із урахуванням випадкових чинників динамічної системи приладу та реологічних властивостей біомеханічної системи “рановий канал-стороннє тіло”.

Теоретичні основи шумо-емісійного методу детекції сторонніх тіл

В основу метода покладено явище створення шумової емісії (коливань частин механічної системи) в момент контакту зі стороннім тілом пружного гнучкого щупу, що вводиться у рановий канал пацієнта. Сам щуп при цьому виконує певні переміщення для збудження, однак в момент контакту гармонійність та одномодовість коливань порушується, а генерована шумова емісія підсилюється і у подальшому піддається розкладенню в ряд Фур'є для наступного аналізу. Тим самим отримують картину спектру коливань, яка відрізняється від спектру без контакту; сам рановий канал створює умови для екранування зовнішніх шумових впливів, що дозволяє використовувати оболонку і пружний щуп як свого роду хвилевод. Сполучення останнього з мембраною в спеціальній камері дозволяє підсилити шум, який у подальшому фіксується мікрофоном та подається на засоби обробки сигналу в звуковому діапазоні частот.

Шумова емісія від контакту зонда з чужорідним тілом буде визначатися пружними властивостями самого зонда (параметри c_i , b_i , рис. 1), його довжиною (l_s) та поперечним перетином s , умовами контакту c_x , b_x , c_y , b_y , c_c , b_c (через рановий канал) з тканинами пацієнта, які виконують роль в'язкопружнопластичного середовища, а також типом і розміром осколка, його масою m_0 .

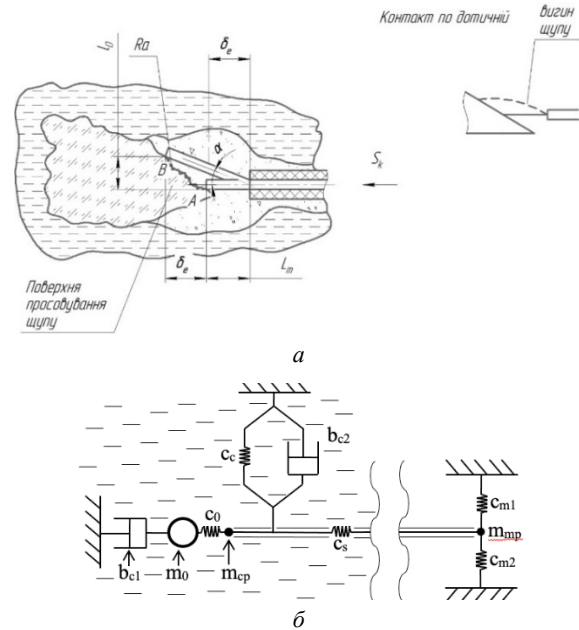


Рис. 1. Умови контакту пружного зонду (а) та розрахункова схема динамічної системи (б) під час ударного контакту

Ослаблення сигналу може визначати глибину проникнення і обумовлюється реологічними властивостями середовища, тоді як шорсткість поверхні та пружні властивості стороннього тіла та самого зонда визначають частотний спектр коливань, який буде реєструвати пристрій.

Аналіз відомих реологічних моделей, наведених у [5], показує, що для опису патологічно змінених тканин пацієнта досить часто використовується модель ідеально пластичного тіла (твердого тіла, розташованого на площині, під час руху якого поверхневе тертя є постійним і не залежить від нормальної сили) Сен-Венана–Кулона. Величина σ , характеризує міцність стороннього тіла: $\sigma < \sigma_b$, $\gamma = 0$. Контакт зі стороннім тілом розглядається як нетривала подія, внаслідок якої кінець зонду починає коливатися та збуджувати мембрану приладу.

Для стрижня певної геометричної форми система звичайних диференціальних рівнянь для власних форм коливань амплітудних функцій визначається так:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 W_l}{dx^2} \right) - \rho F \omega_l^2 W_l = 0,$$

де E – модуль пружності першого роду СТ, ρ – його щільність, ω – частота коливань.

Власні форм коливань відображає система звичайних диференціальних рівнянь у формі

$$\frac{d^4 W}{dx^4} - k_l^4 W_l = 0; \quad k_l^4 = \frac{\rho F}{EI} \omega_l^2.$$

Частковими розв'язками попереднього рівняння будуть чотири вирази $e \pm ikx$, які перетворюються на функції за допомогою формул Ейлера $\sin kx$, $\cos kx$, $\sinh kx$, $\cosh kx$. Тоді загальний розв'язок рівнянь матиме вигляд:

$$W_l = A_l \sin k_l x + B_l \cos k_l x + C_l \operatorname{sh} k_l x + D_l \operatorname{ch} k_l x.$$

Оскільки виявлення стороннього тіла характеризується зміною шумового випромінювання при русі зонда в рановому каналі в момент переміщення по поверхні (контакту) з чужорідним тілом, коливання осколка в тілі як зосередженої маси від силового впливу визначається рівнянням:

$$m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} = c_0 x_0 + b_{01} dx - c_0 (x - x_0) - R,$$

коливання шупа (з приведеною масою рухомих частин m_{cp}) відповідно:

$$m_{cp} \frac{d^2 x_2}{dt^2} = c_0 (x - x_0) - c_s (x - x_2) - R.$$

Тоді поведінка мембрани буде такою:

$$m_{cp} \frac{d^2 x_{23}}{dt^2} = c_s (x - x_2) - \frac{c_{m1} c_{m2}}{c_{m1} + c_{m2}} (x_2 - x_m) - R.$$

Опір середовища розглядається як з боку тканини, так і вздовж осі зонда.

$$\text{Маємо } R = c_c (x_{i-1} - x_i) + b_{c2} \frac{dx_i}{dt}, \text{ що визначає}$$

нелінійну систему диференціальних рівнянь, розв'язок яких здійснено методом Рунге-Кутта.

Для обробки сигналу і збільшення відношення “сигнал/шум” використано спеціальне програмне забезпечення, спрямоване на відділення корисного сигналу від широкосмугового, що надходить після підсилювача низьких частот.

Для отримання спектральної картини коливань взято до уваги наступне. Узагальненим рядом Фур'є для деякої кусочно-безперервної функції є розклад в ряд на основі системи ортогональних функцій:

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n p_n(x) = \begin{cases} f(x), \\ \frac{f(x-0) + f(y-0)}{2} \end{cases}$$

Тут може бути використано тригонометричний базис або, при використанні формули Ейлера, систему експонент із уявними показниками:

$$\left\{ \mu_k(t, \omega_1) = A e^{jk\omega_1 t} \right\}_{k=0, \pm 1, \pm 2, \dots}. \text{ Енергія помилки апроксимації сигналу складає:}$$

$$\left\| x(t) - \sum_i \alpha_i \mu_i(t) \right\|^2 = \|x(t)\|^2 - \sum_i \alpha_i^2 \|\mu_i(t)\|^2 \geq 0.$$

Оскільки усяка періодична функція часу $x(t)$, яка у межах періоду її зміни T задовольняє умовам Діріхле, може бути представлена у вигляді розкладання за тригонометричними функціями Фур'є:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t),$$

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n (n\omega_1 t + \varphi_n)$$

Коефіцієнти ряду визначаються так:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt, \quad a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos n\omega_1 t dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sin n\omega_1 t dt.$$

Тут амплітуда і фаза певної гармонійної складової визначаються у вигляді:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = -\arctan \frac{b_n}{a_n},$$

або:

$$a_n = A_n \cos(\varphi_n) \quad b_n = A_n \sin(\varphi_n).$$

Після даної процедури отримано амплітудні A_n і фазові φ_n частотні спектри сигналу, яку можна представити у вигляді відповідних діаграм та графіків, які не є сталими протягом часу досліджень. Момент контакту шупу зі стороннім тілом є нетривалим, (але за часом достатнім для отримання вибірки шумового сигналу) і може бути повтореним кілька разів. Тому в результаті маємо вибірку перетвореного у ряд Фур'є сигналу, який дозволить ідентифікувати стороннє тіло, що додатково має значну шумову складову та істотний вплив випадкових чинників. Зміна швидкості і тривалості контакту, глибина ранового каналу, щільність біля осколкових тканин, шорсткість поверхні осколку та форма зони контакту – все це певним чином впливає на картини отримуваних спектрів. Якщо амплітуди коливань змінюються випадковим чином, то реологічні властивості та стан поверхні визначає саме ту форму коливань (і ширину спектра), яка отримується в результаті розкладення сигналу в ряд Фур'є. Тобто визначальними є співвідношення $A_i/A_{i+1} \dots$ та $n_i/n_{i+1} \dots$, які дозволяють отримати інформацію щодо наявності стороннього тіла, його приблизної форми.

Раніше нами було показано [6], що при роботі з отримання шумової емісії від контакту зі сторонніми тілами досить часто такий контакт відбувається в умовах, коли дія зовнішніх випадкових чинників є переважною. Це потребує пошуку ефективних засобів компенсації подібних спотворень. Тож отримання максимальної інформативності сигналу в умовах невизначеності та дії випадкових чинників найбільш доцільним вбачається у використанні алгоритмів нейромереж та штучного інтелекту. Використання кластерного аналізу дозволяє відокремити ті компоненти досліджуваної системи, які мають найбільший вплив на відмінності контрольованих сигналів.

Методи досліджень

Відомо, що кластерний аналіз – це задача розбиття заданої вибірки подій на підмножини, кластери, так, щоб кожен кластер складався з схожих об'єктів, а об'єкти різних кластерів істотно відрізнялися. Використання такого аналізу для даного виду досліджень доз-

воляє скоротити кількість охоплених впливових чинників та виокремити ті, дія яких є найбільш результативною.

Для пошуку кластерів детерміновано такі параметри шумової емісії:

- 1) Масив усереднених значень амплітуд A'_j на фіксованих частотах f_k ;
- 2) Відповідні амплітуди A'_1 ; A'_{max} ; A'_n ;
- 3) Кількість M амплітуд, для яких виконується умова:

$$\begin{aligned} [A_{i-1} - A_i] &\leq \delta \\ [A_i - A_{i+1}] &\leq \delta' \end{aligned}$$

Тут δ – критерій відмінності корисного сигналу ід шумових спотворень;

- 4) Ідентифікаційною відмінністю обрано параметр R :

$$R = A_{max} - [A'_{i-1} - A_i]_{\delta}.$$

Введення даного параметру дозволяє за його рівнем детермінувати тип осколка, оскільки він визначає сукупність усіх відмінностей за фіксованою максимальною амплітудою інших гармонік, або іншими словами, однозначно характеризує спектральну картину, рис. 2.

В попередніх роботах (зокрема, [12]) нами показано, що зазвичай у рану потрапляють осколки (сторонні тіла) з різних матеріалів.

Для виконання кластерного аналізу та отримання статистичної вибірки проводили зняття шумових картин за наступними умовами.

Кількість осколків кожного типу – 20 шт., дублювання вимірів відбувалося за вибіркою у 50 фіксованих картин. Їх формували на основі автоматичного за-

хоплення сигналу впродовж 2,0 с. Таким чином, загальна шумова картина для кожного типу осколку складалася із 1000 кадрів. Типізували осколки за 4 групами: Пластик, Скло (двох типів), Природні мінерали. Додатково враховували також і відмінність картин порівняно із металевими осколками, однак в опис дослідження їх не вносили.

Статистичне опрацювання виконували за стандартними процедурами дисперсійного аналізу, перевіркою вибірки щодо належності її елементів до однієї генеральної сукупності за допомогою ω – критерію (оскільки кількість осколків кожного типу – 20 шт, тобто вибірка є малою).

Оскільки номенклатура ознак аналізованих сторонніх тіл (осколків) досить широка, нами запропонована наступна кодифікація осколків у рані, табл. 1, у вигляді $O_j^i - F_k - Rz_l$.

Тоді згенерований план експерименту для отримання статистичної вибірки (масиву даних) має передбачати такі змінні параметри: F_1 : A_{max} ; F_2 : M ; F_3 : f_k ; F_4 : δ ; F_5 : R . Функція відгуку – тип осколку, тип I – метал, тип II – пластик, тип III – мінеральні залишки, тип IV – скло.

Для виявлення кластерів та пошуку найбільш інформативних компонент шумової емісії додатково до параметрів контролю внесені максимальні усереднені амплітуди базових частот з масиву A'_j . Для типізованих осколків $C_2 - F_2 - Rz_l$, $M_1 - F_2 - Rz_3$, $P_2 - F_2 - Rz_l$, $N_2 - F_2 - Rz_l$, згенерований план експерименту має мати також і спектральні картини шумової емісії. Відповідні статистичні дані було внесені до таблиць програмного забезпечення, що дозволило побудувати кластерну діаграму, рис. 2

Таблиця 1. Кодування номенклатури сторонніх тіл (осколків)

Матеріал	Форма осколка		Розміри		Шорсткість поверхні	
Скло	C_1	Округла	F_1	Малі	Rz_1	$> Rz\ 20\ mkm$
	C_2	Видовжена	F_2	Середні	Rz_2	$Rz\ 5...20\ mkm$
	C_3	Скалкова	F_3	Великі	Rz_3	$< Rz\ 5\ mkm$
тал	M_1	Сферичні тіла (шрапнель)	F_1	Малі	Rz_4	$> Rz\ 40\ mkm$
	M_2	Видовжений	F_2	Середні	Rz_5	$Rz\ 10...40\ mkm$
	M_3	Тонкий складнопрофільний	F_3	Великі	Rz_6	$< Rz\ 10\ mkm$
Пластик	P_1	Неправильної форми	F_4	Малі	Rz_7	$> Rz\ 80\ mkm$
			F_1	Середні	Rz_8	$Rz\ 20...80\ mkm$
				Великі	Rz_1	$< Rz\ 20\ mkm$
Мінерали	N_1	Округлої форми	F_1	Малі	Rz_7	$> Rz\ 80\ mkm$
	N_2	Видовжені	F_2	Середні	Rz_8	$Rz\ 20...80\ mkm$
			F_3	Великі	Rz_1	$< Rz\ 20\ mkm$

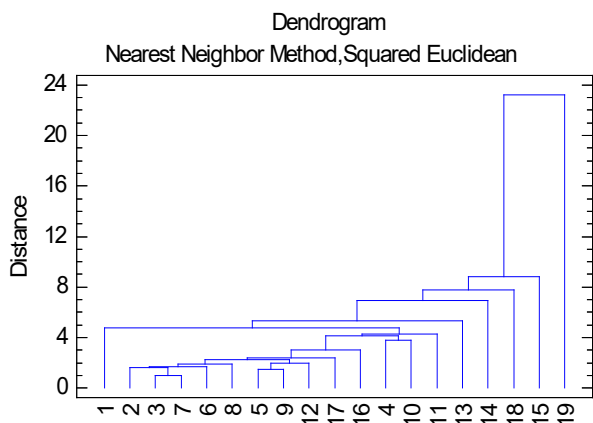


Рис. 2. Кластерна діаграма відмінностей амплітуд для визначення різниць за (1) та встановлення їхніх статистичних значень

Кластерний аналіз довів, що на відміну від загальної кількості варіантів шумової емісії (10 (1 ознака) 11 (2 ознака) 12 (3 ознака) = 1320) маємо, рис. 2, що істотні статистичні відмінності спостерігаються між 19 групами; такі відмінності неоднакові, й найбільшими вони є для 19 групи. До неї належать сторонні тіла із високим модулем пружності, а також поверхнями що мають гострі крайки.

Таким тілами є скляні осколки. Інша група (2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 12) – це осколки з пластику, дерев'яні імітатори, тобто ті тіла, що мають виражені реологічні властивості. При цьому рівень шорсткості поверхні істотного впливу не має. Група ознак 14, 15, 18 – металеві осколки. Однак для них важливим є стан поверхні, зокрема параметр шорсткості R_z .

Граф нейромережових зв'язків між параметрами, що обумовлюють тип осколка набуває відповідного вигляду, рис. 3.

Оскільки кластерний аналіз показав, що встановити відмінність у шумовій картині при діагностиці, наприклад, мінералів, пластику та інших нерентгеноконтрастних СТ за прийнятих умов досить складно, підвищення ефективності розпізнавання типу осколку в тілі пацієнта вбачалося у використанні штучної нейронної мережі. Тоді, використовуючи принципи машинного навчання, маємо змогу визначати тип осколків за аналізом спектру шумової емісії на базі значного статистичного масиву даних, що неодмінно підвищує точність та ефективність методу.

Такий підхід розширює можливості аналізу, хоча і потребує використання досить потужних обчислювальних можливостей ПЕОМ. Окрім того, з'являється можливість відслідковування впливу додаткових чинників. Так, було взято до уваги морфологію ранових каналів [7]:

1. Лінійні канали: характерні для кульових поранень при прямому попаданні. Вхід і вихід майже на одній осі.
2. Звивисті канали: виникають при непрямому ударі або зміні траєкторії всередині тіла (рикошет кістки, зміна напрямку руху кулі).
3. Фрагментовані канали: типові для осколкових поранень, особливо при фугасному вибуху. Множинні вогнища ушкодження.
4. Порожнинні канали: часто виникають при пораненнях високошвидкісними снарядами – утворюється тимчасова порожнина внаслідок гідродинамічного ефекту.

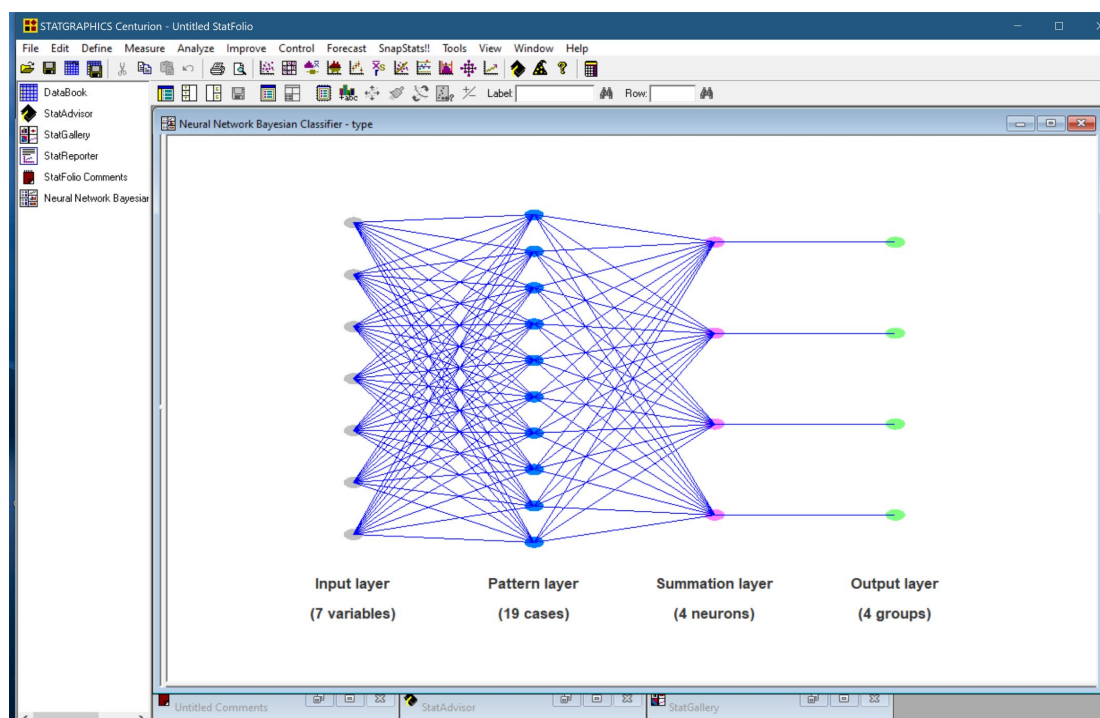


Рис. 3. Групування даних контролю для 4 типів осколків

У процесі об'єднання багаторівневих функцій ASFF використовується для призначення різних просторових ваг об'єктам на різних рівнях, що підвищує важливість ключових рівнів і пом'якшує вплив суперечливої інформації від різних цілей.

Ключова ідея ASFF полягає в тому, щоб адаптивно вивчати просторові ваги злиття для кожної масштабною карти ознак у два етапи: постійне масштабування та адаптивне злиття. Його вектор ознак представлений у вигляді:

$$y_{ij}^l = \alpha_{ij}^l \cdot x_{ij}^{1 \rightarrow l} + \beta_{ij}^l \cdot x_{ij}^{2 \rightarrow l} + \gamma_{ij}^l \cdot x_{ij}^{3 \rightarrow l}.$$

Однак у цьому випадку для базових рівнянь опису динамічної системи, і відповідно, можливості визначення типу осколків за схемою динамічного контакту рис. 1.

$$u(x, t) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\int_0^L q(x) U_l(x) dx}{M_l \sqrt{(\omega_l^2 - \omega^2)^2 + 4h_l^2 \omega^2}} \cos(\omega t - \phi_l),$$

актуальною стає задача максимально точного визначення динамічних параметрів системи, внаслідок чого виникає необхідність стабілізації умов контакту щупу із стороннім тілом.

Паралельна оцінка рівнів сигналу для різних типів сторонніх тіл дозволяє їх розділити на основі максимальної спорідненості до тестових зразків.

Для різних форм коливань усереднені значення співвідношень $A_i/A_{i+1} \dots$ та $n_i/n_{i+1} \dots$ відмінні між собою як всередині групи (тобто контрольовані величини, не-

зважаючи на випадковість прояву, мають похибку, меншу за середнє значення) так і між собою, тобто, для різних груп демонстраторів сторонніх тіл маємо

$$A_i^1/A_{i+1}^1 \dots \neq A_i^2/A_{i+1}^2 \dots \neq A_i^3/A_{i+1}^3 \dots \text{ те саме і для } n_i^1/n_{i+1}^1 \dots \neq n_i^2/n_{i+1}^2 \dots \neq n_i^3/n_{i+1}^3 \dots$$

Таким чином, базуючись на морфологічному поділі діючих факторів, на ознаках $O_j^i - F_k - Rz_l$ сторонніх тіл було створено нейромережу повного перебору змінних чинників із оцінкою у якості вихідних параметрів $A_i/A_{i+1} \dots$ та $n_i/n_{i+1} \dots$.

Тестові зразки в ідеальних умовах дозволили записувати шумову емісію, яка у подальшому обиралася базою для навчання системи.

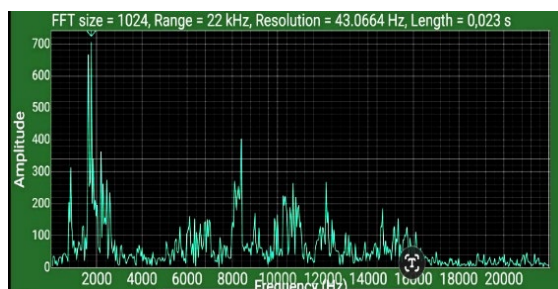
Результати досліджень та їх обговорення

Спектральна щільність моменту руху зонда через рановий канал залишається практично незмінною і має дещо затухаючу характеристику в області більш високих частот. Ширина частотного спектру та пікові амплітуди виявлення стороннього тіла детально проаналізовані у [6] та наведені у табл. 2.

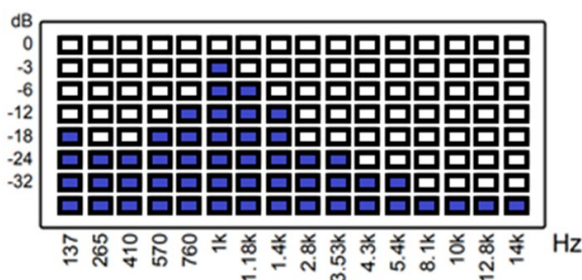
При знятті шумових картин, рис. 6, (спектр отримано при детекції пластикового демонстратора) з усереднення спектральної щільності, була звернута увага на те, що різні метали формували різні форми спектру коливань. Зокрема, це стосувалося заліза (*St*) та, наприклад, кольорових металів (алюмінію *Al*). Такі відмінності були більшими при зростанні розмірів сторонніх тіл у рановому каналі.

Таблиця 2. Ширина частотного спектру та пікові амплітуди при виявленні сторонніх тіл

Матеріал		Спектр
1	М'яка тканина	Частота: 1.18 кГц; Піки амплітуд: до -12 в 570 Гц
2	Пластик	Частота: 2.8–3.53 кГц; Піки амплітуд: до -3 в 1–1.18 кГц
3	Скло	Частота: 8.1 кГц ; Піки амплітуд: до -6 в 3.53–5.4 кГц
4	Залізо	Частота: 12.8–14 кГц ; Піки амплітуд: до -6 в 10–12.8 кГц
5	Деревина	Частота: 3.53 кГц ; Піки амплітуд: до -3 в 1.18 кГц
6	Кістка	Частота: 8.1 кГц ; Піки амплітуд: до -3 в 1–3.53 кГц



а



б

Рис. 6. Спектри шумової емісії, зафіксовані спектроаналізатором (а) та усереднені, отримані запропонованими алгоритмами (б)

При цьому максимальної точності (відмінності спектрів як параметра пошуку) було досягнуто за умови збудження пружного зонда механічним засобом, який контактував з оболонкою зонда. Параметри механічної системи були наступними: діаметр оболонки 5,2 мм із внутрішнім діаметром отвору 1,75 мм; діаметр використовуваного шупу (витого на металевій основі) 1,2 мм; довжина (від кінчика до мембрани) – 310 мм, діаметр мембрани – 56 мм, товщина – 0,08 мм).

Залежність точності ідентифікації сторонніх тіл їх розмірами (b, l, h) показала наступне, рис. 7.

Прийнятний рівень ідентифікації було отримано для сторонніх тіл розмірами понад 5,0 мм. Менші розміри сторонніх тіл давали значно гірший результат, особливо за умови значного занурення у рані (коли шуми та спотворення від самого ранового каналу (у межах –12 дБа) починають перевищувати рівень корисного сигналу. При розмірах, менших за 3,5 мм виявлення стороннього тіла взагалі було ускладнене, особливо з огляду на його пружні або квазіпружні властивості. При цьому також зникав ефект ідентифікації стороннього тіла: спектральні картини втрачали індивідуальність та особливості.

Інша особливість полягала у тому, що металеві сторонні тіла мали явно виражену нелінійну точність детекції, пов'язану, очевидно, також із пружними властивостями. Саме з цих позицій подальші дослідження потребували поділу металевих частинок на дві категорії, відмінні за модулями пружності першого (E) та другого (G) роду.

Застосування алгоритмів Yolo покращило результати. Це особливо спостерігалось на детекції малих (менших за 5,0 мм) сторонніх тілах.

Відповідні дані подані у табл. 3. У чисельнику – до обробки сигналу алгоритмами Yolo, у знаменнику – після застосування алгоритмів Yolo.

Напрацювання статистики (тобто кілька кратного дублювання дослідів як для типізованого стороннього тіла, так і для випадкового) підвищила точність, однак для дрібних частинок остання залишалася досить низькою – на рівні 0,50...0,45.

З наведеної вище ілюстрації рис. 8 стає очевидним, що використання алгоритмів Yolo значно підвищує точність ідентифікації: в середньому точність зростає на 50...75 %, проте цей рівень не однаковий для всіх типів сторонніх тіл. Ось значення Re для наступ-

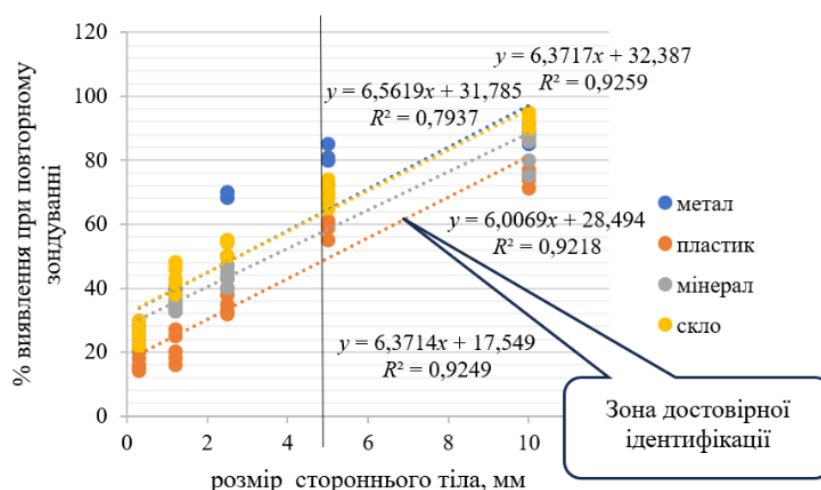


Рис. 7. Точність ідентифікації сторонніх тіл (%) у функції характерних розмірів, мм (тіла відповідали класифікаційним ознакам табл. 1)

Таблиця 3. Рівні коефіцієнтів кореляції Re спектрів шумової емісії з типом сторонніх тіл

Частота збудження, kHz	Параметри шупу	Тип СТ				
		Me		Неметал		
		Сталь	Al та його сплави	Скло	Пластик	Мінерал
0,63	Діам.0,45 мм, довжина 350 мм	0,35/ 0,65	0,45/ 0,59	0,62/ 0,91	0,44/ 0,69	0,42/ 0,76
1,2		0,33/ 0,61	0,48/ 0,56	0,55/ 0,88	0,37/ 0,70	0,39/ 0,72
2,5		0,38/ 0,69	0,47/ 0,61	0,61/ 0,89	0,39/ 0,69	0,41/ 0,76
6,3		0,35/ 0,65	0,43/ 0,68	0,58/ 0,85	0,40/ 0,72	0,43/ 0,74
10,0		0,31/ 0,64	0,48/ 0,54	0,59/ 0,84	0,43/ 0,71	0,45/ 0,78

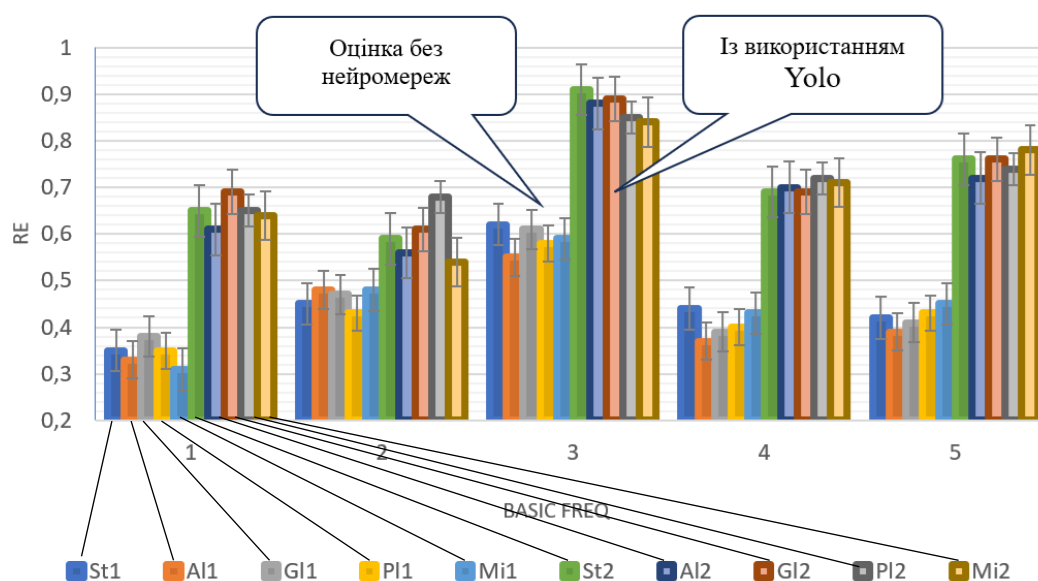


Рис. 8. Порівняння коефіцієнта кореляції між формою та характером сигналу шумового випромінювання та типом стороннього тіла: St1...Mi1 – до використання алгоритму та St2...Mi2 – після обробки файлових сигналів за допомогою алгоритму Yolo

них випадків: *St* – визначення сталевих фрагментів; *Al* – визначення алюмінієвих фрагментів; *Gl* – визначення скла; *PL* – визначення пластикової частини; *Mi* – визначення мінерального залишку. Індекс 1 стосується випадку звичайної ідентифікації, індекс 2 – випадку використання алгоритмів Yolo.

Тож можна констатувати, що застосування машинного навчання істотно підвищує ефективність ідентифікації СТ у пацієнтів, і не потребує залучення значних обчислювальних потужностей.

Найбільш якісно можна ідентифікувати неметалеві сторонні тіла, згідно з таблицею 3, тоді як тип середовища (як зазначено в таблиці 2) не має суттєвого впливу на точність ідентифікації. Фактор частоти збудження коливань зонда є більш ефективним: найзадовільніші результати отримано для частоти збудження 2,5 кГц.

Також було виявлено, що параметри зонда можуть суттєво впливати на амплітуди коливань, але частотний спектр залишатиметься своєрідним ідентифікатором сторонніх частинок у тілі пораненого.

Встановлено, що точність виявлення сторонніх тіл зростає зі збільшенням кількості знятих характеристик. Тенденція для різних типів фрагментів залишається незмінною, але точність визначення типу фрагмента за контрольованими параметрами з урахуванням розсіювання контрольованих значень $\pm\delta_f$ та ΔA_{ij}^{max} знає змін: якщо у вибірці з 10..15 вимірювань та $\pm\delta_f = 21...27\%$, ΔA_{ij}^{max} – на $35...42\%$, то точність ідентифікації становила $70...75\%$, тому збільшення кількості визначень до 100 навіть зі зменшенням розсіювання до значення $\pm\delta_f = 14...18\%$, $\Delta A_{ij}^{max} = 18...22\%$ збільшило точність визначення до $92...95\%$. Ця тенденція спостерігається і надалі. Отже, можна стверджувати, що використання алгоритмів Yolo дозволяє системі

більш раціонально виконувати визначення контрольованого фактора (в даному випадку, картини випромінювання шуму), властивого наявності стороннього фрагмента в організмі пацієнта.

Практична реалізація приладу

На першому етапі досліджень було розроблено конструкцію приладу, що мав у складі рукоятку із основою та змінний шуп зонду, який може піддаватися стерилізації або бути разовим.

Виконання приладу наведено на рис. 9.



Рис. 9. Прилад для ревізії ранового каналу

На шупі встановлюють захисну трубку, що утворює разом зі шупом суцільну конструкцію. Трубка має повністю закривати шуп і не створювати перепон перед введенням у рановий канал. Вивільнення кінця шупу можливе тільки після повного введення зонду в

рановий канал перед зніманням шумової емісії. Після подачі живлення в ручці засвітиться червоний індикатор, а на дисплеї відобразиться шкала базових частот.

Ввівши зонд у рановий каналі та переміщуючи назад і вперед шуп, ініціюють коливання від проковзування кінця шупу по сторонньому тілу, які дозволяють отримувати інформацію:

1) про наявність стороннього тіла (внаслідок появи окремих чітко виявлених піків сигналу), у той час як відсутність сторонніх тіл надає картину розподілу шумової емісії близької до розподілу Гауса;

2) про тип стороннього тіла. Форма картини дозволяє оцінити тип стороннього включення (більш пружні тіла мають більш виражені сплески частот);

3) про приблизний розмір тіла: більші тіла в контакті зі шупом при його русі більш тривалий час.

Однак у подальшому було запропоноване схемне рішення, яке реалізовувало дещо інший алгоритм початкової обробки сигналу, рис. 10.

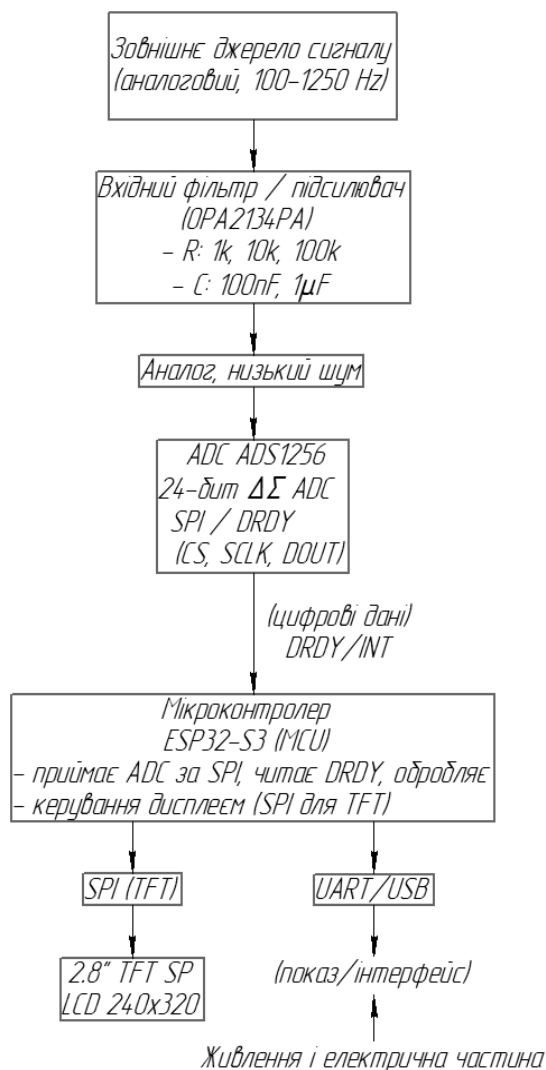


Рис. 10. Алгоритм обробки сигналу

Це дозволило встановити інформаційний блок у вигляді дисплею із окремими зонами відображення, рис. 11. Додатково встановили індикатор ймовірності

точної ідентифікації. Тепер виміри виконували на основі збереженої у пам'яті пристрою інформації щодо можливих відмінностей форм спектрів, характерних для кожного типу стороннього тіла.



Рис. 11. Приклади роботи приладу із дисплеєм

Таке рішення спростило роботу із приладом. Іншою перевагою стало те, що прилад при роботі не потребує підключення до мережі INTERNET, скорочуючи тим самим час на дослідження рани та виконання ідентифікації.

Таким чином, застосування його дозволяє пропонувати до використання у якості ургентного приладу в польових умовах, як оснащення бригад швидкого медичного реагування, додатково – при оперативних втручаннях в умовах стабілізаційних пунктів у невідкладних випадках.

Оскільки прилад конструктивно виконаний із зондом, що складається з оболонки та гнучкого пружного шупу, оболонка із відокремленою камерою також може слугувати каналом введення анестетиків та дезінфікуючих (промиваючих) розчинів у рановий канал; подальша робота щодо створення компресорів високого тиску, які працюють із фізіологічним розчином, дозволить побудувати модульну систему як виявлення, так і вилучення сторонніх тіл із ранових каналів, особливо невеликих (до 5...8 мм) розмірів.

В цілому завдяки застосуванню машинних методів навчання вдалося забезпечити рівень ідентифікації 70 % та вище, що є важливим показником ефективності використання приладу.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання

Показано, що використання методів спектрального аналізу шумової емісії від контакту спеціального гнучкого шупу зі стороннім тілом дозволяє встановити наявність фрагмента у рані, а також має перспективи у визначенні його приблизних розміру та типу. При цьому інформація фіксується і аналізується алгоритмами, заснованими на перетвореннях Фур'є, та на усередненні рівнів спектральних гармонік зі створенням своєрідного "цифрового відбитка" стороннього тіла.

Доведено функціональну обумовленість ширини спектру сигналу шумової емісії в момент механічного контакту з фрагментом у рані, його формою та типом. Тож шумове випромінювання, яке виникає при нестатичному контакті гнучкого пружинного зонда із зовнішнім тілом у рановому каналі, може служити достатньо інформативним сигналом для виявлення наявності стороннього тіла у рані. Оскільки прилад компактний та не потребує високої кваліфікації медика первинної допомоги та спеціальних умов його використання, він є перспективним для медицини катастроф.

Поліпшення точності ідентифікації сторонніх тіл у рані пацієнта вимагає накопичення значного обсягу статистичної інформації. З цієї метою планується сполучення блоку ідентифікації з модулем Wi-Fi та наступним під'єднанням до накопичувача інформації на базі ПЕОМ із відповідним програмним забезпеченням.

Стаття підготовлена в рамках науково-дослідної роботи (НДР): “Розробка інноваційного портативного пристрою для виявлення уламків в рані, включаючи не рентгенконтрастні” за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України конкурсу “Наука для зміцнення обороноздатності України” (№ 2023.04/0145).

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлений в цій статті.

Використання штучного інтелекту

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

References

- [1] V. Chorna et al., “The characteristics of injuries from various types of weapons depend on the individual’s location at the moment of the explosion”, *Ukraine, Nation’s Health*, No. 2, pp. 113–121, 2024, doi: <https://doi.org/10.32782/2077-6594/2024.2/19>.
- [2] K. Faguy, “Imaging foreign bodies”, *Radiologic Technology*, Vol. 85(6), pp. 655–682, 2014.
- [3] Philip J. Withers et al., “X-ray computed tomography,” *Nature Reviews Methods Primers*, 18, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1038/S43586-021-00015-4>.
- [4] K. S. Tupikov, S. V. Shkel, V. M. Orel, O. F. Salenko, and V. A. Cherniak, “Vysokotekhnolohichni innovatsii v medychnii praktysii, shcho riaduiut zhyttia ta povertaiut zdorovia poranenym pid chas viiskovykh dii,” in *Proc. 6th Int. Sci. and Practical Conf. Science and Innovation of Modern World*, London, United Kingdom, Feb. 23–25, 2023, pp. 163–171.
- [5] V. A. Stoyan, *Modelyuvannya ta identyfikatsiya dinamiki sistem iz rozpodilenyimi parametrami*, Kyiv: Kyiv universitet, 2003. 187 p.
- [6] M. Maqbool, “Computed Tomography,” *An Introduction to Medical Physics*, pp. 221–262, Nov. 2017, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61540-0_8.
- [7] V. A. Tymoniuk and E. N. Zhyvotnova, *Biophysics*, Kyiv: Professional, 2007.
- [8] O. Salenko et al., “The possibility of detecting non-x-ray fragments in the body of the wounded by the contact method”, *Mech. Adv. Technol.*, Vol. 7, No. 3 (99), pp. 337–349, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.3.294822>.
- [9] K. Zhiannu, M. Baldan and A. Molde, Viyskovo-Polyova surgery. The work of surgeons for the minds of sharing resources during times of violent conflicts and other situations of violence, 2013, 389 p.
- [10] A. Kapoor, A. Gulli, S. Pal, and F. Chollet, *Deep Learning with TensorFlow and Keras: Build and deploy supervised, unsupervised, deep, and reinforcement learning models*, 3rd ed. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd., 2022.
- [11] H. Bakır and R. Bakır, “Evaluating the robustness of yolo object detection algorithm in terms of detecting objects in noisy environment”, *Journal of Scientific Reports-A*, (054), pp. 1–25, 2023, doi: <https://doi.org/10.59313/jsr-a.1257361>.
- [12] Indrajit Mandal, P. Santosh Kumar Patra and Dipti Prava Sahu, “An Expert System for Diagnosis Of Human Diseases,” *International Journal of Computer Applications*, Vol. 1, No. 13, 2010, doi: <https://doi.org/10.5120/279-439>.
- [13] A. H. Ashraf et al., “Weapons detection for security and video surveillance using CNN and YOLO-v5s”, *Comput. Mater. Contin.*, Vol. 70, No. 4, pp. 2761–2775, 2022, doi: <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.018785>.
- [14] S. Pavlov et al., “Healing features of experimental injuries of soft tissues that contain foreign bodies in the form of fragments of military personnel uniforms,” *BMJ Mil. Health*, Vol. 169(e1), pp. e59–e63, 2023, doi: <https://doi.org/10.1136/bmjilitary-2020-001666>.
- [15] V. Cherniak, O. Salenko, K. Karpenko and V. Pryiemska, “Surgical treatment of a gunshot wound with a foreign body: using the sensitivity of the tactile sensor,” in *SWorld-Ger Conference proceedings*, 2025, pp.78-89.

Neural Networks and Artificial's Intelligence's Algorithms in the Tasks of Diagnostics Foreign Bodies in the Wound Channel of Patients

Oleksandr Salenko¹ • Viktor Cherniak² • Vadym Orel³ • Bohdan Salenko⁴

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

³ Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine

⁴ National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

Abstract. The paper considers a device in which information about the presence of a foreign body a fragment in a wound is obtained using a special compact sensor: a mechanical elastic flexible rod, which is placed in a protective soft tube and connected to a sealed chamber, one of the walls of which is a membrane capable of converting the vibrations of the rod into sound waves, which, propagating in the chamber, are recorded by a microphone. Mounted in a convenient housing, the sensor is connected to sound frequency filters (up to 15 kHz) via an amplifying link and allows you to obtain a noise signal, based on which you can detect the contact of the rod with a foreign body during its movement in the patient's wound. The difference in the spectrum patterns suggests that such a device can be used not only to detect foreign bodies, but also to identify them.

The use of neural networks and artificial intelligence algorithms significantly improves the accuracy of foreign body detection, especially for small objects and those whose rheological properties are similar to the patient's tissue. Thus, with the appropriate adjustment of the device, the accuracy of foreign body diagnosis is currently up to 65–95 % for bodies larger than 3.5–5.0 mm; higher accuracy is observed when detecting bodies with pronounced elastic properties.

It has been shown that the use of this device allows obtaining information about the presence of a foreign body (due to the appearance of separate clearly defined signal peaks), while the absence of foreign bodies gives a picture of noise emission distribution close to the Gaussian distribution; about the type of foreign body. The shape of the pattern allows one to assess the type of foreign inclusion (more elastic bodies have more pronounced frequency spikes); to estimate the approximate size of the body: larger bodies are in contact with the probe for a longer time as it moves.

Keywords: wound diagnosis tools, foreign bodies, noise emission, neural networks and artificial intelligence, determination.
