

УДК 681.7: 616-71

Н. І. ЗАБОЛОТНА, В. В. ШОЛОТА, В. Ю. МАСЛОВСЬКИЙ ШОЛПАН ЖУМАГУЛОВА

НЕЧІТКІ МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО ІНВАРІАНТНІЙ ДІАГНОСТИЦІ ІШЕМІЇ МІОКАРДА

*Вінницький національний технічний університет, 21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця,
Україна, E-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com*

Вінницький національний медичний університет ім. М. Пирогова, Україна

Казахський Національний Університет імені Аль-Фарабі, Алмати-050000, Казахстан

Анотація. Розроблено моделі вирішальних правил для підтримки прийняття рішення за принципами нечіткої логіки для системи азимутально незалежного поляризаційного картографування азимутів та еліптичностей поляризаційних зображень біологічних шарів. Оцінено достовірність диференціації станів хронічної та гострої ішемії міокарда при лазерній поляризаційно інваріантній діагностиці.

Ключові слова: система, поляризаційно інваріантна діагностика, підтримка прийняття рішень, біологічна тканина, нечіткі моделі, ішемія міокарда.

Abstract. Models of decision rules have been developed to support decision-making based on the principles of fuzzy logic for a system of azimuthally independent polarization mapping of azimuths and ellipticities of polarization images of biological layers. The reliability of differentiation of chronic and acute myocardial ischemia in laser polarization-invariant diagnosis was evaluated.

Key words: system, polarization invariant diagnostics, decision support, biological tissue, fuzzy models, myocardial ischemia.

DOI: 10.31649/1681-7893-2023-45-1-97-105

ВСТУП

Враховуючи те, що третина смертельних випадків в світі припадає на серцево-судинні захворювання, необхідність розвитку новітніх лазерних методів та засобів для їх діагностики не викликає сумніву. Зокрема, при проведенні судово-медичної експертизи важливим є використання поляриметричних методів діагностики гострої ішемії міокарда з раптовим настанням смерті, які дозволяють оперативно, об'єктивно та з високою достовірністю провести оцінювання змін поляризаційних параметрів біологічних шарів (БШ) серцевого м'яза, доповнюючи відомі методики.

Так, достовірність оцінювання патологічних змін БШ міокарда, обумовлених ішемією серця, отримана при застосуванні систем поляризаційного та мюллер-матричного картографування та аналізу, коливається від 80% до 88% [1-3]. В той же час, серед ключових недоліків таких систем слід назвати погану відтворюваність даних, обумовлену азимутальною залежністю розподілів азимутів та еліптичностей поляризації лазерних зображень БШ від величини повороту їх зондування. Тому слід очікувати, що застосування більш точних, азимутально незалежних методів поляризаційного картографування БШ [4, 5] стане одним із ключових чинників покращення достовірності діагностики гострої ішемії серця. Тоді як, з іншого боку, складна структура поляризаційно інваріантних мап азимутів та еліптичностей поляризації лазерних зображень БШ серцевого м'яза вимагає застосування їх інтелектуального аналізу із сучасними методами підтримки прийняття рішення (ППР), наприклад, на основі нечіткої логіки [6, 7].

Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання змін мап азимутів та еліптичностей поляризації БШ в системі поляризаційної діагностики ішемії міокарда шляхом розвитку методів азимутально незалежної лазерної поляриметрії в поєднанні із запровадженням нечітких моделей підтримки прийняття рішення в системі.

МЕТОД ТА СИСТЕМА АЗИМУТАЛЬНО ІНВАРІАНТНОГО ПРЯМОГО
КАРТОГРАФУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ МАП АЗИМУТІВ ТА ЕЛІПТИЧНОСТІ
БІОЛОГІЧНИХ ШАРІВ

Опираючись на модельний підхід [1, 2], можна стверджувати, що морфологічна структура будь-якого оптично тонкого БШ наділена властивостями аморфно-кристалічної структури при взаємодії із поляризованим лазерним випромінюванням. На цій основі знаходять зв'язок морфологічних змін БШ, обумовлених патологіями, і змін величин елементів вимірюваних мап азимутів та еліптичностей поляризації зображення БШ, що лежить в основі поляризаційної діагностики біологічних тканин (БТ).

За результатами робіт [5, 8] встановлено, що застосування циркулярно поляризованого лазерного пучка з довжиною хвилі 0,64 мкм для опромінення досліджуваного БШ в системі поляризаційного картографування дозволяє здійснити азимутально інваріантне вимірювання мап азимутів та еліптичностей поляризації зображення БШ.

Отже, прямий метод азимутально інваріантного картографування мап азимутів $\alpha(x, y)$ та еліптичностей $\beta(x, y)$ поляризації зображень БШ реалізують за допомогою системи, архітектура якої наведена на рисунку 1.

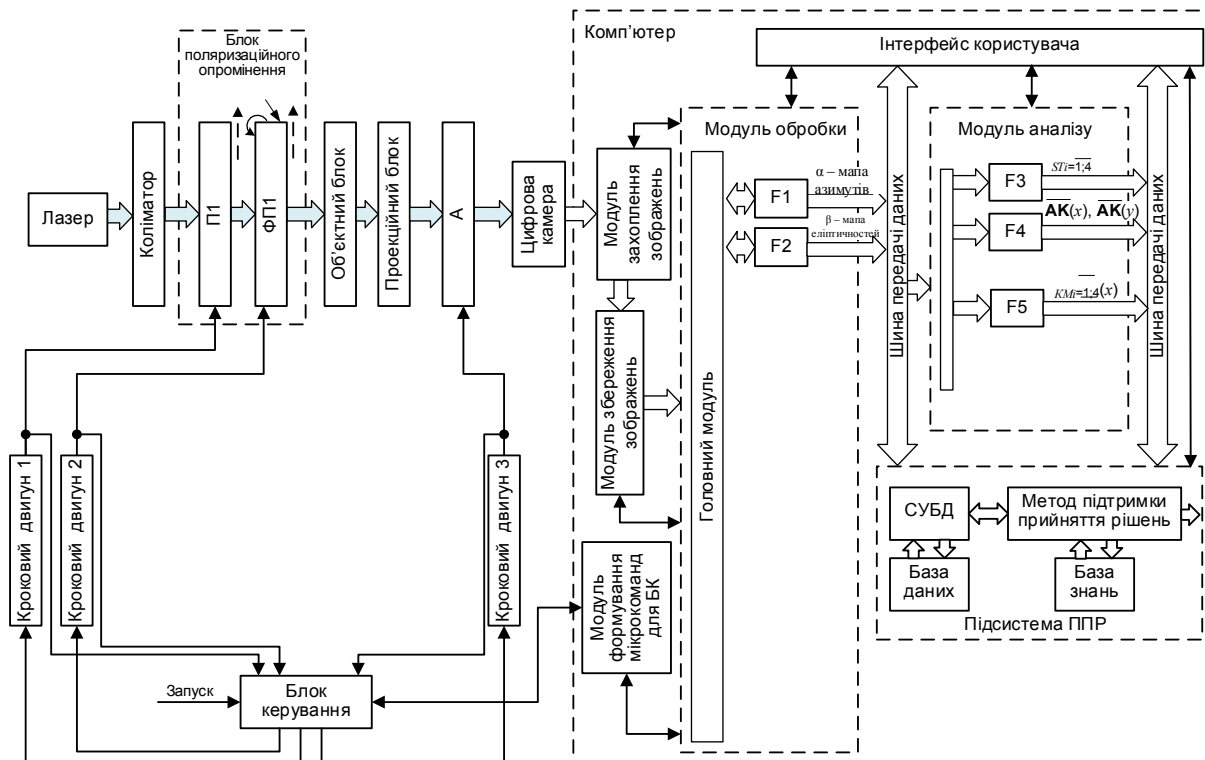


Рисунок 1 - Архітектура системи азимутально інваріантного картографування біологічних шарів із ППР

Система містить автоматизований вимірювальний блок, який реалізує метод прямого азимутально інваріантного вимірювання мап азимутів та еліптичностей поляризації зображень БШ за нижченаведеним алгоритмом.

1. Пропускаємо пучок, сформований лазерним діодом з довжиною хвилі 0,64 мкм, через блок поляризаційного опромінення, формуючи циркулярно поляризований лазерний пучок.
2. Циркулярно поляризованим лазерним пучком опромінюємо БШ, розташований в об'єктному блоці.
3. Обертаємо вісь пропускання аналізатора з постійним кроком в межах діапазону $0^{\circ} - 180^{\circ}$.
4. На кожному кроці $\Delta\varphi$ обертання осі пропускання аналізатора, нахиленої під кутом $\varphi(0^{\circ} \leq \varphi \leq 180^{\circ})$, проектуємо відповідне зображення БШ з розподілом інтенсивностей

$I(x, y)^{(\varphi)}$ за допомогою проєкційного блоку в площину цифрової камери з роздільною здатністю $(M \times N)$ пікселів та запам'ятовуємо його в комп'ютері системи.

5. Визначаємо програмно за допомогою модуля обробки системи двовимірні $(M \times N)$ розподіли мінімальних $I_{\min}(x, y)^{\varphi 1}$ та максимальних $I_{\max}(x, y)^{\varphi 2}$ рівнів інтенсивностей для кожного окремого пікселя (x, y) зображень розмірності $(M \times N)$ записаних в комп'ютер. Також програмно визначаємо кути обертання відповідно $\varphi 1$ та $\varphi 2$, які забезпечували $\varphi 1(I(M \times N) \equiv \min); \varphi 2(I(M \times N) \equiv \max)$.
6. Визначаємо програмно мапу азимутів $\alpha(x, y)$ і мапу еліптичностей $\beta(x, y)$ поляризації зображення біологічного шару при $x = \overline{1 : M}; y = \overline{1 : N}$ за формулами

$$\alpha(x, y) = \varphi 1(I(x, y) \equiv \min) - \frac{\pi}{2};$$

$$\beta(x, y) = \operatorname{arctg} \frac{I(x, y)_{\min}}{I(x, y)_{\max}},$$
(1)

До складу системи на рисунку 1 входить модуль аналізу вимірних азимутально інваріантних мап азимутів та еліптичностей поляризації лазерного зображення БШ. Він містить програмні блоки визначення оцінок ST_1 - ST_4 статистичних моментів (F3), визначення автокореляційної функції (F4) та знаходження оцінок KM_1 - KM_4 кореляційних моментів автокореляційного розподілу (F5) за відомими співвідношеннями [7, 9]. Формуємо на їх основі вектор інформативних ознак отриманих мап, наприклад, для мапи азимутів, у вигляді

$$V(\alpha) = [ST_1 \quad ST_2 \quad ST_3 \quad ST_4 \quad KM_1 \quad KM_2 \quad KM_3 \quad KM_4].$$
(2)

За цим вектором отримуємо модель ППР в системі при проведенні діагностики БШ, орієнтуючись на застосування принципів побудови вирішальних правил на основі нечіткої логіки [10].

За максимінними правилами нечіткої логіки синтезуємо моделі обчислення функції належності мапи азимутів та мапи еліптичностей БШ до досліджуваних функціональних станів, наприклад, «норма» $Z_{\alpha}^{норма}, Z_{\beta}^{норма}$, «діагноз 1» $Z_{\alpha}^{діагноз1}, Z_{\beta}^{діагноз1}$, «діагноз 2» $Z_{\alpha}^{діагноз2}, Z_{\beta}^{діагноз2}$. Це реалізуємо за відповідними векторами ознак мапи азимутів $V(\alpha)$ та мапи еліптичностей $V(\beta)$.

Обираючи відповідні максимальні значення серед обрахованих значень функцій належності для мап азимутів та максимальне значення формуємо рекомендований діагноз.

НЕЧІТКІ МОДЕЛІ ППР ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЗМІН МАП АЗИМУТІВ В ПРИ ПОСМЕРТНІЙ ДІАГНОСТИЦІ ІШЕМІЇ МІОКАРДА

Для розробки моделей ППР при діагностиці ішемії міокарда на основі нечіткої логіки експериментальні дослідження проводилось для контрольної групи, групи з ішемічною хворобою (ІХ) та групи з гострою коронарною недостатністю (ГКН) загальною кількістю 63 зразків оптично тонких БШ. В кожній групі було по 21 зразку.

В результаті проведення прямого азимутально інваріантного вимірювання мап азимутів та еліптичностей поляризації та їх аналізу за вищенаведеним алгоритмом для всіх зразків БШ серцевого м'яза було отримано усереднені в межах груп оцінки інформативних ознак мап, наведені в таблиці 1 та таблиці 2. Інформативними оцінками для азимутально незалежних мап азимутів та еліптичностей шарів міокарду виявились лише оцінки статистичних моментів ST_1, ST_3, ST_4 для мап азимутів та ST_2 - ST_4 для мап еліптичностей, а також оцінки кореляційних моментів KM_2, KM_4 для обох мап.

За отриманими інформативними ознаками формується відповідний вектор, за яким проводиться віднесення досліджуваного зразка до одного із трьох можливих класів: «норма», «хронічна ішемія» чи «ГКН» за вирішальними правилами, реалізованими сучасними технологіями інтелектуального аналізу.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Класичні імплементації відомих методів підтримки прийняття рішень, особливо методи машинного навчання, вимагають для навчання наявності дуже великої тренувальної вибірки зображень, які характеризують конкретне захворювання. На жаль, бази даних із поляризаційними мапами БШ при конкретному захворюванні міокарда є лише в невеликій кількості. На шляху усунення цього недоліку актуальним є застосування методів нечіткої логіки для побудови ППР, в яких вирішальне правило можна синтезувати на основі інформативних ознак зображень, отриманих на невеликих вибірках.

Згідно з методикою побудови вирішальних правил підсистеми ППР на основі нечіткої логіки проводимо розбиття діапазону змінювання кожного із інформативних параметрів розподілів азимутів та еліптичностей поляризації шару міокарда на 5 піддіапазонів, що відповідають якісним нечітким термам низький (Н), нижче середнього (НС), середній (С), вище середнього (ВС), високий (В).

Таблиця 1

Середнє та стандартне оцінок розподілів елементів мап азимутів та еліптичностей поляризації зображень БШ міокарда

Параметр	Контрольна група (гр.1)	Гостра коронарна недостатність (гр.2)	Хронічна ішемічна хвороба серця (гр.3)
Азимути поляризації			
ST ₁	0,16±0,012	0,09±0,008	0,11±0,011
ST ₂	0,34±0,021	0,21±0,016	0,23±0,017
ST ₃	0,61±0,052	0,39±0,028	0,48±0,045
ST ₄	1,13±0,011	1,27±0,023	0,89±0,014
KM ₂	0,07±0,004	0,13±0,0011	0,11±0,01
KM ₄	2,02±0,15	1,23±0,12	1,68±0,15
Еліптичність поляризації			
ST ₁	0,53±0,042	0,61±0,054	0,63±0,059
ST ₂	0,24±0,017	0,16±0,013	0,19±0,016
ST ₃	0,59±0,044	0,79±0,063	0,62±0,059
ST ₄	0,27±0,017	0,47±0,041	0,35±0,029
KM ₂	0,17±0,014	0,11±0,009	0,09±0,008
KM ₄	0,53±0,042	0,61±0,054	0,63±0,059

При налаштуванні функцій належності інформативних ознак $Z^{H,HC,C,BC,B}(r)$ до нечітких термів на інтервалі [0;1] використовується відома функція [6], чий графік наведено на рисунку 2.

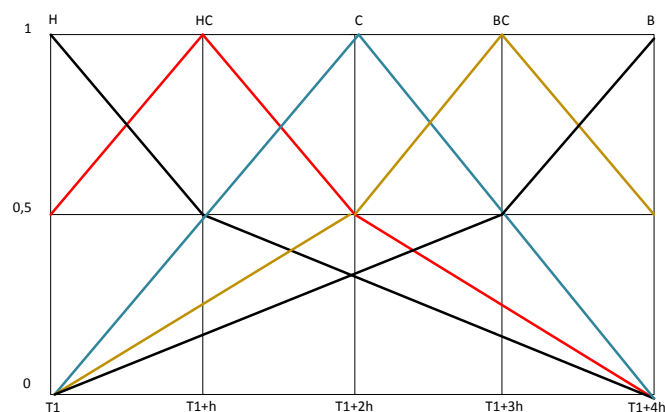


Рисунок 2 – Функції належності $Z^H(r), Z^{HC}(r), Z^C(r), Z^{BC}(r), Z^B(r)$

За розробленою експертами базою знань, представленою в таблиці 2 та таблиці 3, та вищенаведеними функціями належності нечітких термів [6] розроблено моделі вирішальних правил ППР при лазерній поляризаційно інваріантній діагностиці стану міокарда.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Таблиця 2

База знань для нечіткої діагностики міокарда за мапами азимутів поляризаційного зображення

Стан	ST ₁	ST ₃	ST ₄	KM ₂	KM ₄
Норма	BC B	BC B	B	H	BC B
Хронічна ішемія	H HC	H HC	H	B	H HC
Гостра коронарна недостатність	HC C	H HC	H	HC C BC	HC C

Таблиця 3

База знань для нечіткої діагностики міокарда
за мапами еліптичностей поляризаційного зображення

Стан	ST ₂	ST ₃	ST ₄	KM ₂	KM ₄
Норма	BC B	H HC	H HC	BC B	H HC
Хронічна ішемія	H HC	C BC B	C BC B	HC C	BC B
Гостра коронарна недостатність	HC C	H HC C	HC C	H	HC C

Так, нечітка модель вирішального правила ППР із визначенням приналежності досліджуваного зразка БШ міокарда до групи «норма» за аналізом мап азимутів описується функцією належності $Z_{азимут}^{норма}(ST_1, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4)$, що визначається за такою формулою:

$$\begin{aligned}
 & Z_{азимут}^{норма}(ST_1, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4) = \\
 & = \left\{ \left[z^{BC}(ST_1(r)) \wedge z^{BC}(ST_3(r)) \wedge z^B(ST_4(r)) \wedge z^H(KM_2(r)) \wedge z^{BC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \vee \left[z^B(ST_1(r)) \wedge z^{BC}(ST_3(r)) \wedge z^B(ST_4(r)) \wedge z^H(KM_2(r)) \wedge z^{BC}(KM_4(r)) \right] \vee \\
 & \vee \left[z^{BC}(ST_1(r)) \wedge z^B(ST_3(r)) \wedge z^B(ST_4(r)) \wedge z^H(KM_2(r)) \wedge z^{BC}(KM_4(r)) \right] \vee \\
 & \vee \left[z^B(ST_1(r)) \wedge z^B(ST_3(r)) \wedge z^B(ST_4(r)) \wedge z^H(KM_2(r)) \wedge z^{BC}(KM_4(r)) \right] \vee \\
 & \vee \left[z^{BC}(ST_1(r)) \wedge z^{BC}(ST_3(r)) \wedge z^B(ST_4(r)) \wedge z^H(KM_2(r)) \wedge z^B(KM_4(r)) \right] \vee \\
 & \vee \left[z^B(ST_1(r)) \wedge z^{BC}(ST_3(r)) \wedge z^B(ST_4(r)) \wedge z^H(KM_2(r)) \wedge z^B(KM_4(r)) \right] \vee \\
 & \vee \left[z^{BC}(ST_1(r)) \wedge z^B(ST_3(r)) \wedge z^B(ST_4(r)) \wedge z^H(KM_2(r)) \wedge z^B(KM_4(r)) \right] \vee \\
 & \left. \vee \left[z^B(ST_1(r)) \wedge z^B(ST_3(r)) \wedge z^B(ST_4(r)) \wedge z^H(KM_2(r)) \wedge z^B(KM_4(r)) \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{3}$$

де \wedge – знак логічної кон'юнкції над нечіткими операндами; \vee – знак логічної диз'юнкції над нечіткими операндами.

Нечітка модель вирішального правила ППР із визначенням приналежності досліджуваного зразка БШ міокарда до групи «хронічна ішемія» за аналізом мап азимутів описується функцією належності $Z_{азимут}^{хрон.ішемія}(ST_1, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4)$

За аналогією синтезується нечітка модель $Z_{азимут}^{ГКН}(ST_1, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4)$ вирішального правила ППР із визначенням приналежності досліджуваного зразка БШ міокарда до групи «ГКН» за аналізом мап азимутів.

$$\begin{aligned}
 & Z_{\text{азимут}}^{\text{хрон. швидк.}}(ST_1, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4) = \\
 & = \left\{ \left[z^H(ST_1(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{HC}(ST_1(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^H(ST_1(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{HC}(ST_1(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^H(ST_1(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{HC}(ST_1(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^H(ST_1(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{HC}(ST_1(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Знайшовши максимальне із трьох значень функцій приналежності $\max(Z_{\text{азимут}}^{\text{НОРМА}}, Z_{\text{азимут}}^{\text{ГКН}}, Z_{\text{азимут}}^{\text{ХІ}})$, формується рекомендація підсистеми ППР щодо діагнозу.

$$\begin{aligned}
 & Z_{\text{азимут}}^{\text{норма}}(ST_2, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4) = \\
 & = \left\{ \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^H(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^{BC}(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^H(ST_3(r)) \wedge z^H(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^{BC}(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \vee \right. \\
 & \left. \left[z^B(ST_2(r)) \wedge z^{HC}(ST_3(r)) \wedge z^{HC}(ST_4(r)) \wedge z^B(KM_2(r)) \wedge z^{HC}(KM_4(r)) \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

За розробленою експертами базою знань, представленою в таблиці 3, та функціями належності нечітких термів [6] було розроблено моделі вирішальних правил ППР для проведення діагностики стану міокарда за мапами еліптичностей поляризації зображень БШ.

Нижче наведемо приклад моделі нечіткого вирішального правила ППР із визначенням функції приналежності $Z_{еліптичн.}^{ГКН}(ST_1, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4)$ групи «ГКН» мап еліптичностей поляризації зображень зразків БШ міокарда у вигляді логічного рівняння:

Моделі вирішальних правил ППР із визначенням функцій приналежності $Z_{еліптичн.}^{норма}(ST_1, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4)$ та $Z_{еліптичн.}^{хрон.ішемія}(ST_1, ST_3, ST_4, KM_2, KM_4)$ зразків БШ міокарда відповідно до групи «норма» та групи «ішемічна хвороба» на основі мап їх еліптичностей поляризації зображень отримано за аналогією та в статті не наводяться.

Знайшовши максимальне із трьох значень функцій приналежності $\max(Z_{еліпт.}^{НОРМА}, Z_{еліпт.}^{ГКН}, Z_{еліпт.}^{ХІ})$, формується рекомендація підсистеми ППР щодо діагнозу.

Використане програмне забезпечення (ПЗ) в архітектурі системи, наведеної на рисунку 1, для реалізації лазерної поляризаційно інваріантної діагностики БШ міокарда передбачає застосування раніше розробленої авторами інформаційної підсистеми ППР [6], доповненої реалізованими на мові Java нечіткими моделями виду (1)-(5) та базою даних експертів, реалізованою у вигляді СУБД PostgreSQL.

Як результат тестування роботи удосконаленого ПЗ з новими нечіткими моделями ППР визначено достовірність диференціації діагнозів «хронічна ішемія» та «ГКН» (таблиця 4) : В таблиці введено позначення: TP - правильне рішення про наявність «ішемічної хвороби», TN - правильне рішення про наявність «ГКР», FP – хибне рішення про наявність «ішемічної хвороби», FN – хибне рішення про наявність «ГКР».

Таблиця 4

Порівняння оцінок достовірності диференціації діагнозів «ІХ»-«ГКН» міокарда за методами азимутально незалежного прямого вимірювання мап азимутів та еліптичностей поляризації ППР

N з/п	Назва методу	Категорія та кількість рішень				Оцінка достовірності, %
		TP	FP	TN	FN	
1	Метод прямого азимутально-незалежного картографування азимутів поляризації БШ із аналізом даних і ППР	20	1	20	1	95,2%
2	Метод прямого азимутально-незалежного картографування еліптичностей поляризації БШ із аналізом даних і ППР	19	2	20	1	92,8%
3	Метод прямого азимутально-незалежного картографування азимутів і еліптичностей поляризації (прототип) [8]	19	2	18	3	88%

Очевидно, що підвищення достовірності на 7,2% та на 4,8% відповідно в перших двох методах азимутально незалежного картографування мап азимутів та еліптичностей БШ в порівнянні з прототипом при диференціації діагнозів «хронічна ішемія» та «ГКН» обумовлено застосуванням інтелектуального аналізом вимірних мап із новими нечіткими моделями вирішальних правил.

ВИСНОВКИ

Удосконалено архітектуру системи азимутально інваріантного картографування мап азимутів та еліптичностей поляризації лазерних зображень БШ за рахунок введення модулів аналізу та ППР.

Розроблено нечіткі моделі ППР для проведення лазерної поляризаційно інваріантної діагностики ішемії міокарда та їх програмну реалізацію.

Проведено оцінку достовірності диференціації діагнозів «хронічна ішемія» та «ГКН» за допомогою розроблених нечітких моделей при азимутально незалежному картографуванні мап азимутів та еліптичностей поляризації БШ міокарда та показано зростання достовірності відповідно на 7,2% та на 4,8% у порівнянні з аналогом, в якому відсутнє застосування методів ППР.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні тканини людини / [Ушенко О.Г., Ушенко Ю.О., Томка Ю.Я. та ін.] / за ред. О.Г. Ушенка. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2010. 588 с.
2. Методи і засоби лазерної поляриметрії біологічних тканин: монографія / [Ушенко О.Г., Павлов С.В., Заболотна Н.І. та ін.]. Вінниця: Едельвейс, 2019. 269 с.
3. О.Я. Ванчуляк Експертна оцінка гострої ішемії міокарда поляризаційно-кореляційними методами: дис. ... доктора мед. наук: 14.01.25 / ЧНУ, Чернівці, 2016. 292 с.
4. V. A. Ushenko, M. S. Gavrylyak, "Azimuthally invariant Mueller-matrix mapping of biological tissue in differential diagnosis of mechanisms protein molecules networks anisotropy". *Proc. SPIE*. 2016. Vol. 8812, 88120Y.
5. O.H. Ushenko, M.P. Horskyi, I.V. Soltys, O.V. Dubolazov. "3D polarization algorithms for processing digital microscopic images of polygraphic polymers". *Технологія і техніка друкарства*, 2022. №1(75), с.37–41.
6. Н.І. Заболотна, О.В. Бісікало, В.В. Шолота. "Підтримка прийняття рішень в системі поляризаційної зображальної діагностики гістологічних зрізів за аналізом їх параметрів анізотропії", *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2021. № 2 (40). С. 29–40.
7. N.I. Zabolotna, V.V. Sholota, etc. Azimuthally invariant system of Mueller-matrix polarization diagnosis of biological layers with fuzzy logical methods of decision-making. *Proc. SPIE*. 2022. Vol. 12476, 1247608.
8. Y.A. Ushenko. Scale-selective polarization cartography of biological polycrystalline net. *Proc. SPIE*. 2012. Vol. 8498. P. 84980Z.
9. Processing and analysis of images in the multifunctional classification laser polarimetry system of biological objects / Zabolotna N.I. et all. *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10750. 107500N, P. 1-8.
10. Perspectives of the application of medical information technologies for assessing the risk of anatomical lesion of the coronary arteries / Pavlov S. V., Mezhiievska I. A., Wójcik W. [et al.]. *Science, Technologies, Innovations*. 2023. №1(25), 44-55 p.

REFERENCES

1. Osnovy lazernoj poliarymetrii. Biolohichni tkanyny liudyny / [Ushenko O.H., Ushenko Yu.O., Tomka Yu.Ia. ta in.] / za red. O.H. Ushenka. Chernivtsi: Chernivetskyi nats. un t, 2010. 588 s.
2. Metody i zasoby lazernoj poliarymetrii biolohichnykh tkanyn: monohrafiia / [Ushenko O.H., Pavlov S.V., Zabolotna N.I. ta in.]. Vinnytsia: Edelweis, 2019. 269 s.
3. Vanchuliak O. Ya. Ekspertna otsinka hostroi ishemii miokarda poliaryzatsiino-koreliatsiiny my metodamy: dys. ... doktora med. nauk: 14.01.25 / ChNU, Chernivtsi, 2016. 292 s.
4. V.A. Ushenko, M.S. Gavrylyak, "Azimuthally invariant Mueller-matrix mapping of biological tissue in differential diagnosis of mechanisms protein molecules networks anisotropy". *Proc. SPIE*. 2016. Vol. 8812, 88120Y.
5. O.H. Ushenko, M.P. Horskyi, etc. "3D polarization algorithms for processing digital microscopic images of polygraphic polymers". *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 2022. №1(75), с.37–41.
6. Zabolotna N. I., Bisikalo O. V., Sholota V. V. "Pidtrymka pryiniattia rishen v systemi poliaryzatsiinoi zobrazhalnoi diahnostryky histolohichnykh zriziv za analizom yikh parametriv anizotropii", *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii*. 2021. № 2 (40). С. 29–40.
7. N. I. Zabolotna, V.V. etc. "Azimuthally invariant system of Mueller-matrix polarization diagnosis of biological layers with fuzzy logical methods of decision-making". *Proc. SPIE*. 2022. Vol. 12476, 1247608.
8. Ushenko Y.A. Scale-selective polarization cartography of biological polycrystalline net. *Proc. SPIE*. 2012. Vol. 8498. P. 84980Z.
9. Processing and analysis of images in the multifunctional classification laser polarimetry system of biological objects / Zabolotna N.I. et all. *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10750. 107500N, P. 1-8.
10. Perspectives of the application of medical information technologies for assessing the risk of anatomical lesion of the coronary arteries / Pavlov S. V., Mezhiievska I. A., Wójcik W. [et al.]. *Science, Technologies, Innovations*. 2023. №1(25), 44-55 p.

ДОДАТКОВА ІНФОРМАЦІЯ

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України, Проект 2022.01/0135

Надійшла до редакції 02.02.2023 р.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

ЗАБОЛОТНА НАТАЛІЯ ІВАНІВНА – д.т.н., доцент, професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
e-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

ШОЛОТА ВЛАДИСЛАВА ВЛАДИСЛАВІВНА – магістр з інформаційних технологій,
Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, *e-mail: vladislava.sholota@gmail.com*

МАСЛОВСЬКИЙ ВАЛЕНТИН ЮРІЙОВИЧ — д.м.н, доцент кафедри внутрішньої медицини No. 3,
Вінницький національний медичний університет ім. М. Пирогова, м. Вінниця, вул. Пирогова, 56, 21018,
e-mail: vmaslovskiy@gmail.com

ЖУМАГУЛОВА ШОЛПАН – магістр, кафедра інтелектуальних систем управління, Казахський
Національний Університет імені Аль-Фарабі, Алмати-050000, Казахстан, *e-mail: sh.zhumagulovakz@gmail.com*).

Nataliia. ZABOLOTNA, Vladyslava SHOLOTA, Valentyn MASLOVSKYI, Sholpan ZHUMAGULOVA

FUZZY DECISION-MAKING MODELS WITH LASER POLARIZATION INVARIANT DIAGNOSTICS OF MYOCARDIAL ISCHEMIA

Vinnitsia National Technical University
Vinnitsia National Medical University by named M. Pyrogov
Kazakh National University named after Al-Farabi