

М.Хвостівський

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МЕТОД АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОРЕТИНОСИГНАЛУ ДЛЯ РАННЬОЇ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ СІТКІВКИ ОКА ЛЮДИНИ

Розроблено метод аналізу електроретиносигналу сітківки ока людини на базі математичної моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, який на відміну від відомих дає змогу оцінити стан зорового аналізатора, зокрема його сітківку, на ранній стадії її захворювання. Установлено, що отримані спектральні компоненти є характеристиками інформативних ознак електроретиносигналу і відповідають функціональному стану сітківки ока людини.

M.Khvestivsky

THE METHOD OF ANALYSIS OF ELECTRORETINOSIGNAL IS FOR EARLY DIAGNOSTICS OF THE STATE OF RETINA OF EYE OF MAN

The method of analysis of electroretinosignal retina of eye of man is developed on the base of mathematical model as the periodically correlated casual process which unlike known enables to estimate the state of visual analyzer, in particular his retina, on the early stage of its disease. Set, that spectral components are got are descriptions of informing signs of electroretinosignal and answer the functional state of retina of eye of man.

Вступ. Однією з актуальних проблем сучасної офтальмології є отримання максимально повної інформації про стан сітківки ока людини, на основі якої можна було б розширити ранню діагностику зорового аналізатора. Розвиток комп'ютерних технологій та сучасних методів цифрового опрацювання сигналів дали змогу побудувати та широко використовувати в медичній практиці комп'ютерні автоматизовані офтальмодіагностичні системи (ДКЗО-01 (Україна), Calypso (США) та інші).

У клінічній офтальмології широко визнані електрофізіологічні методи дослідження, побудовані на основі аналізу електроретиносигналу (ЕРС), який є відгуком сітківки ока людини на світловий спалах.

Найпростіші методи аналізу електроретиносигналів пов'язані з дослідженням амплітудно-часових характеристик екстремальних точок (максимумів і мінімумів) отримуваних кривих. За математичну модель в такому випадку використано детерміновану функцію, яка описує електроретиносигнал у межах одного періоду (Яворський Б.І., Юзьків А.В.) [1]. Такий підхід має обмежені можливості для опису реальних сигналів і може використовуватися для характеристики електроретиносигналу в межах одного періоду.

Значною мірою детермінований підхід удосконалюється при використанні стохастичного підходу щодо побудови математичної моделі електроретиносигналу. Перші кроки у цьому напрямку було зроблено Мацюком О.В., Паламаром М.І. [2,3] Математичною моделлю електроретиносигналів у цих роботах вважають стаціонарний лінійний випадковий процес. Проте ця стохастична модель електроретиносигналу в повній мірі не відображає у своїй структурі макромеханізм його породження, тому що електроретиносигнал є складним за своєю природою сигналом, що містить у собі випадковість та повторюваність.

У праці Драгана Я.П., Осухівської Г.М., Хвостівського М.О. [4,5] на основі аналізу макромеханізму породження електроретиносигналу обґрунтовано його модель як нестационарний випадковий процес у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП), яка поєднує в собі властивості повторюваності із випадковістю.

1. Формулювання задачі

На базі математичної моделі ЕРС як ПКВП можна реалізувати метод аналізу сигналу, який дасть змогу визначити нові інформативні ознаки для задач ранньої діагностики стану сітківки ока людини.

2. Метод аналізу ЕРС як ПКВП

Методи аналізу імовірнісних характеристик будують, виходячи з властивостей множин співфазних значень ЕРС, що дає змогу за однією реалізацією η -ергодичного ЕРС оцінити фазову структуру його коваріації і середнього, тобто зміну їх у часі, а не лише їх середні значення. Отримані послідовності відліків через період корельованості ЕРС є не лише стаціонарними та стаціонарно зв'язаними, але і мають властивості ергодичності та ергодичної зв'язаності. Умову ергодичності такого процесу формулюється як ергодичність та ергодичну зв'язаність його стаціонарних компонент.

На основі властивостей ПКВП виділимо два основні методи аналізу імовірнісних характеристик ЕРС — компонентний та синфазний [6].

Синфазний метод базується на тому, що відліки значень ЕРС через період корельованості при різному виборі початку відліку (початкової фази) $t_0 \in [0, T)$ утворюють стаціонарну ергодичну векторну випадкову послідовність $\{\xi(t_0), t_0 \in [0, T)\}$, де $\xi(t_0) \equiv \{\xi(t_0 + kT), k \in Z\}$. На основі даного методу характеристики ЕРС обчислюють за виразами:

$$\hat{m}(t) = \frac{1}{2N+1} \sum_{k=0}^{N-1} \xi(t+kT), \quad (1)$$

$$\hat{b}(t, u) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \xi(t+u+kT) \xi(t+kT), \quad (2)$$

де $\xi^0(t) = \xi(t) - \hat{m}(t)$ - центровані значення випадкового процесу $\xi(t)$, T - період корельованості.

Компонентний метод виходить з того, що характеристики ЕРС є періодичними функціями від часу, а тому можуть бути представлені за допомогою розкладів типу рядів Фур'є:

$$\hat{m}(t) = \sum_{k \in Z} \hat{m}_k \exp\left(ik \frac{2\pi}{T} t\right), \quad (3)$$

$$\hat{b}(t, u) = \sum_{k \in Z} \hat{B}_k(u) \exp\left(ik \frac{2\pi}{T} t\right), \quad (4)$$

де m_k , $B_k(u)$ — оцінки компонент математичного сподівання (1) та коваріаційної функції (2).

Кореляційний аналіз ЕРС, окрім отримання оцінок коваріації $\hat{b}(t, u)$, ставить також задачу знаходження оцінок коваріаційних компонент $\hat{B}_k(u)$, які характеризують структуру часової мінливості. Оцінювання коваріаційних компонент здійснюється за статистикою $\hat{b}(t, u)$:

$$\hat{B}_k(u) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{b}(t, u) \exp\left(-ik \frac{2\pi}{T} t\right) dt. \quad (5)$$

Синфазний і компонентний методи аналізу ЕРС, згідно з енергетичною теорією стохастичних сигналів та обґрунтованої математичної моделі ЕРС у вигляді ПКВП, є методами аналізу їхніх імовірнісних характеристик. Для того, щоб вибрати один із описаних методів аналізу проаналізуємо ЕРС.

На рис. 1 зобразимо ЕРС, через множину відгуків у часовій області. Оскільки ЕРС (рис. 1) – це множина відгуків, зсунутих у часі один відносно одного на сталий період T , тому його зображено у вигляді [7]:

$$\xi(t) = \sum_{k \in Z} \chi_{D_k}(t) \cdot \xi_{\text{відгук}_k}(t + kT), \quad (6)$$

де $\chi_{D_k}(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i \in D_k \\ 0, & \text{якщо } i \notin D_k \end{cases}$ - індикаторна функція, $D_k = [kT, (k+1)T)$;

T - період одного відгуку ЕРС, який є сталою величиною;

$\xi_{\text{відгук}}$ - випадковий процес у межах одного періоду T (відгуку ЕРС в межах одного періоду T).

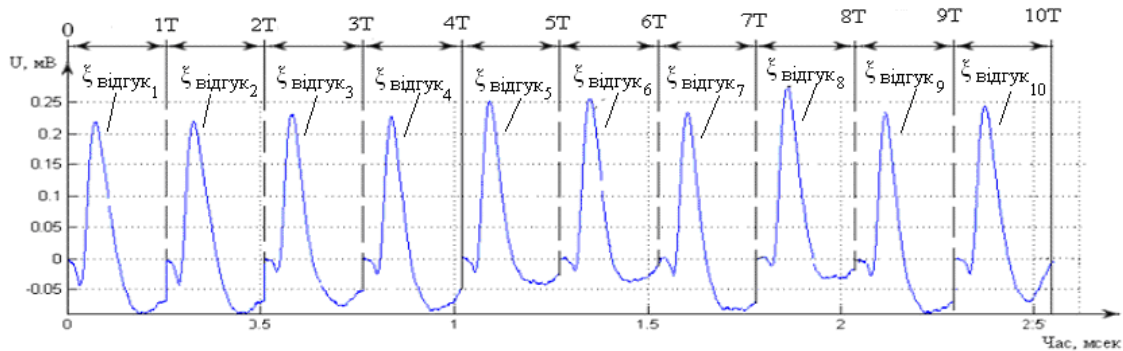


Рисунок 1 – Множина відгуків електроретиносигналу

Синфазний метод аналізу ЕРС, на відміну від компонентного, за своєю методикою представлення нестационарного випадкового процесу через стаціонарні компоненти в часовій області адекватно відображає макромеханізм породження електроретиносигналу (6) (однорідність фаз). Тому для аналізу ЕРС як ПКВП доцільно використати синфазний метод з подальшим переходом із часової області в частотну.

3. Результати опрацювання електроретиносигналів

Для реєстрації електроретиносигналу використано стандартні методи (в даному випадку - система для офтальмодіагностики ДСЗО-1 (Україна, розробники - Ткачук Р.А., Паламар М.І., Мацюк О.В.).

На рис. 2, а-г зображено зареєстровані системою „ДСЗО-1” електроретиносигнали пацієнтів А і Б з нормою та пацієнтів В і Г з патологією (центральна дегенерація сітківки ока).

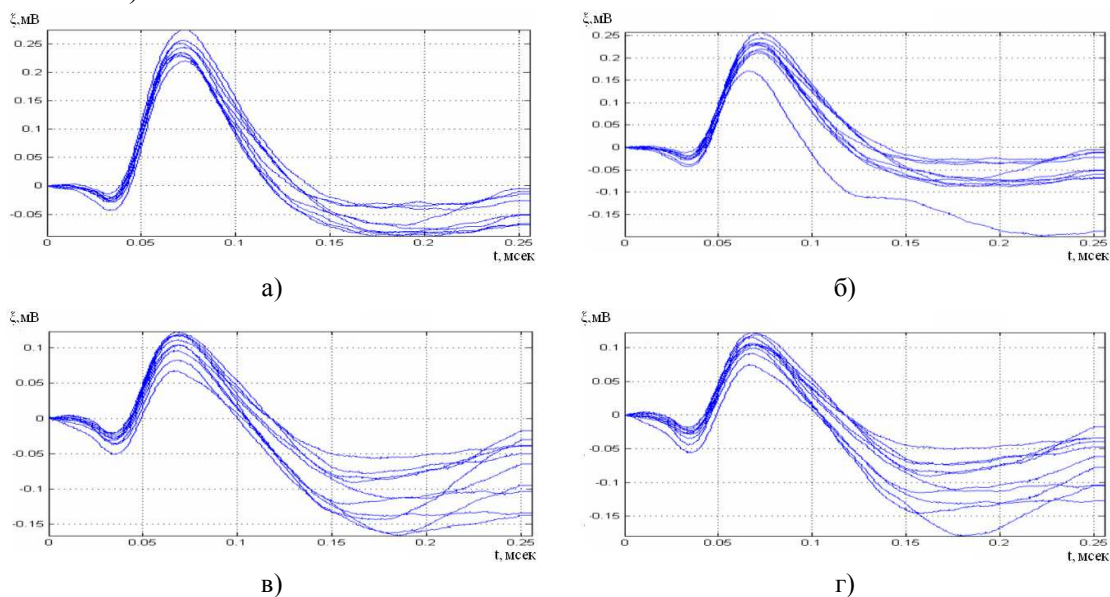


Рисунок 2 – Зареєстровані ЕРС:

- а) Пацієнт А
 - б) Пацієнт Б
 - в) Пацієнт В
- } норма
- } патологія

г) Пацієнт Г

Зареєстровані електроретиносигнали (рис.2,а-г) є відгуками сітківки ока на серію світлових спалахів одного і того самого ока, тому природно ці відгуки ЕРС зобразити на одній осі часу (рис. 3.а-г). Таке подання дає можливість побачити залежність зміни у часі відгуку сітківки ока від спалаху до спалаху.

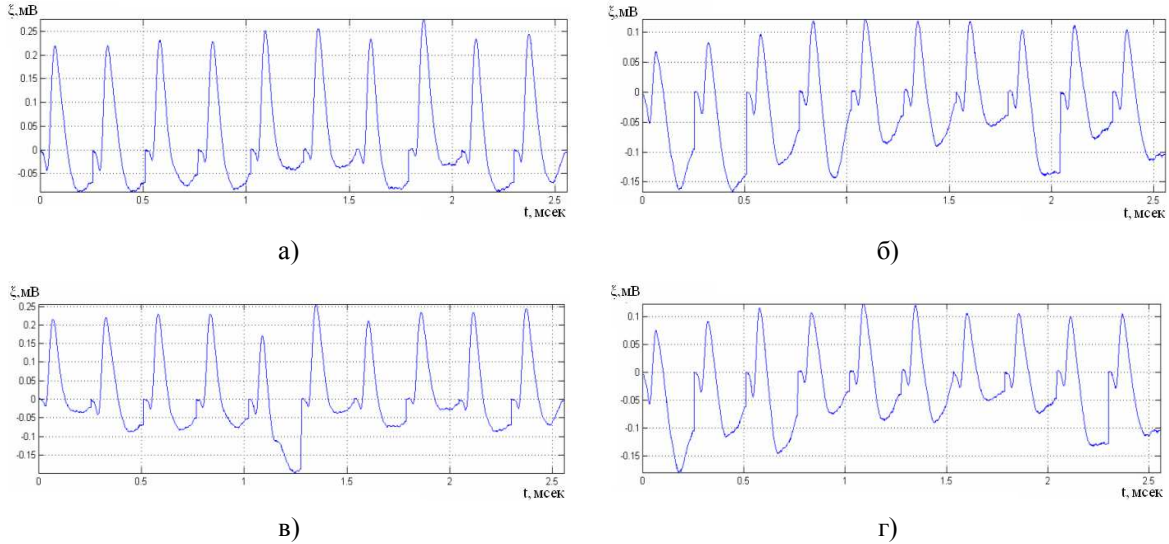


Рисунок 3 – Зображення ЕРС на одній осі часу при часовій періодичності світлових спалахів:

- | | |
|--------------|-------------|
| а) Пацієнт А | } норма |
| б) Пацієнт Б | |
| в) Пацієнт В | } патологія |
| г) Пацієнт Г | |

Ансамблі електроретиносигналів у вигляді їх періодичних продовжень (рис. 3,а-г) враховують у своїй структурі властивості повторюваності й випадковості та відображають макромеханізм їх породження [4,5].

Наступним етапом дослідження є отримання інформативних ознак ЕРС синфазним методом. Тому із ЕРС (рис. 3) визначено стаціонарні компоненти (рис. 4).

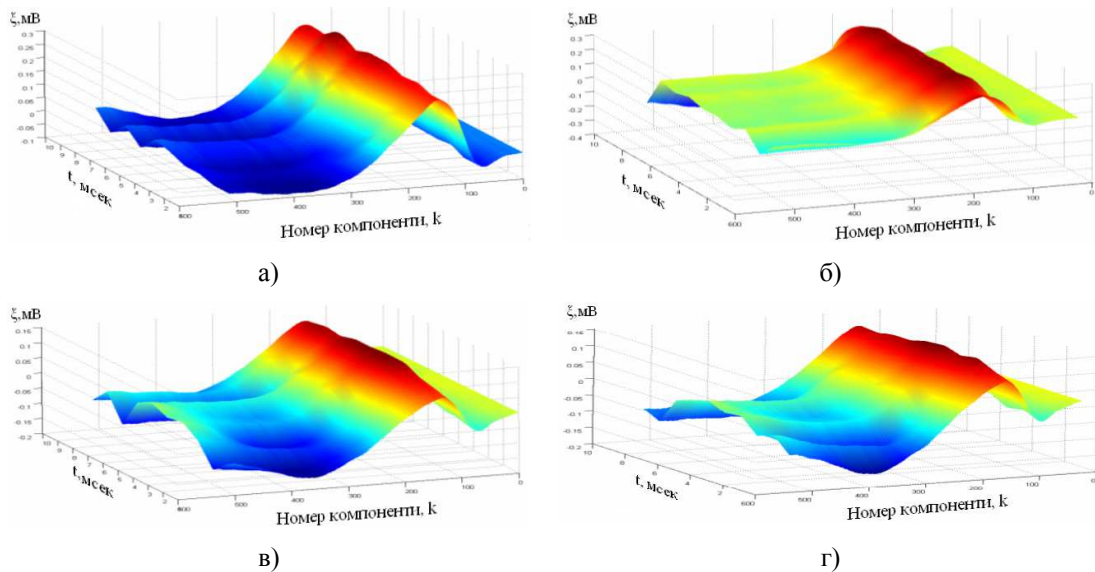


Рисунок 4 – Реалізації стаціонарних компонент електроретиносигналів:

- | | |
|--------------|---------|
| а) Пацієнт А | } норма |
| | |

- б) Пацієнт Б
 - в) Пацієнт В
 - г) Пацієнт Г
- } патологія

Основною імовірнісною характеристикою ЕРС, яка характеризує розподіл потужності центрованих сигналів, є коваріаційна функція. Тому базуючись на синфазному методі аналізу ЕРС, обчислено оцінку коваріаційної функції $\hat{b}(t, u)$ згідно з виразом (2) (рис. 5).

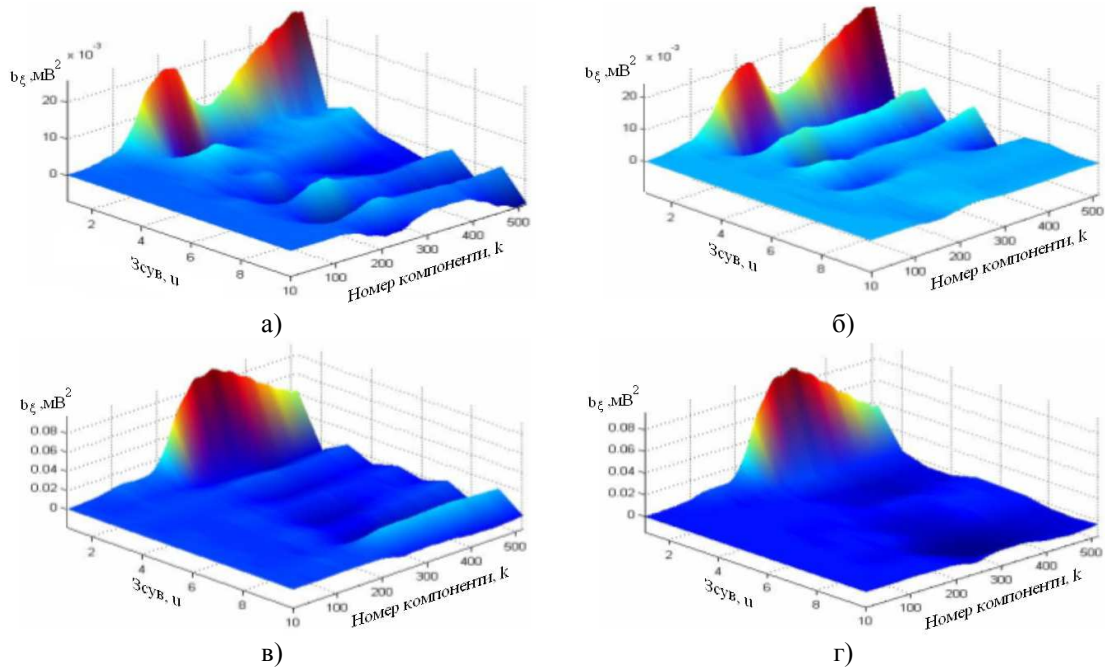
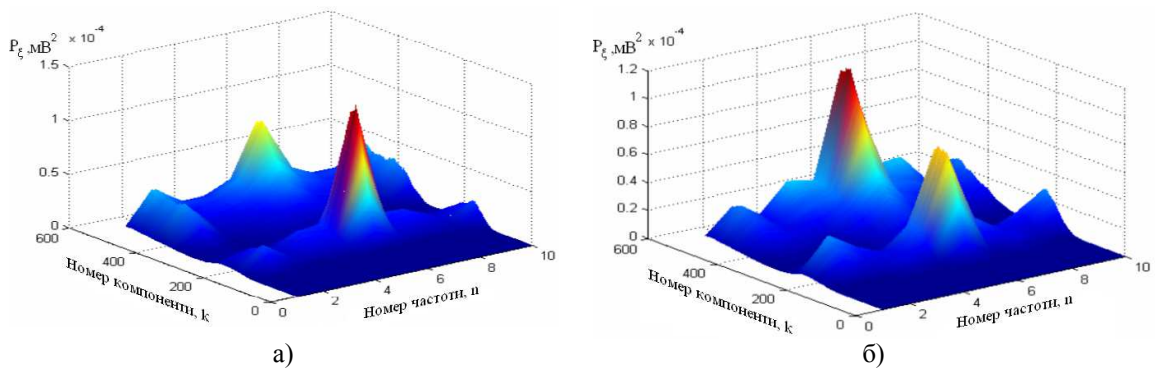


Рисунок 5 – Реалізації коваріаційних функції стаціонарних компонент:

- а) Пацієнт А
 - б) Пацієнт Б
 - в) Пацієнт В
 - г) Пацієнт Г
- } норма
} патологія

Від отриманих оцінок стаціонарних компонент отримано спектральні компоненти згідно з виразом (5) – спектри коваріаційних функцій стаціонарних компонент (потужність).



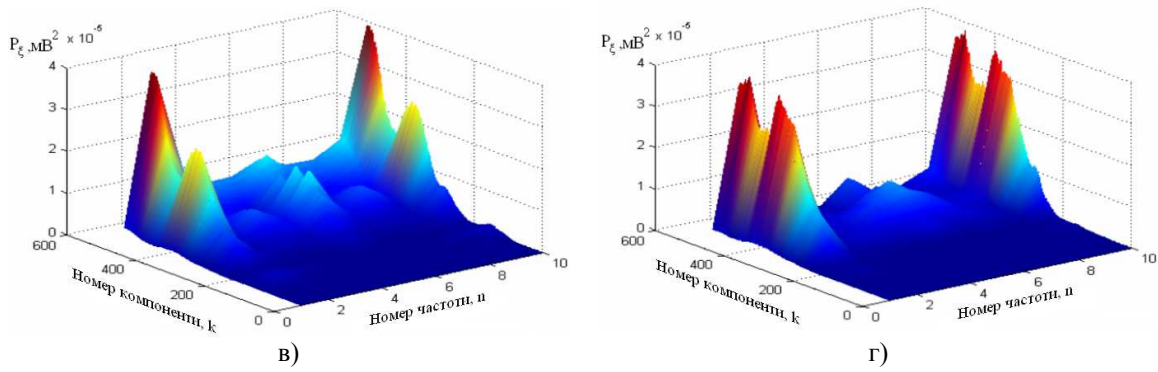


Рисунок 6 – Реалізації спектральних компонент:

- | | |
|--------------|-------------|
| а) Пацієнт А | } норма |
| б) Пацієнт Б | |
| в) Пацієнт В | } патологія |
| г) Пацієнт Г | |

Для оцінювання спектральних компонент (рис. 6) використано оцінку математичного сподівання:

$$M_k \{P_{\xi_{kn}}\} = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} P_{\xi_{kn}}, \quad n = \overline{1, N_T}, \quad k = \overline{1, N_k}, \quad (7)$$

де k - номер спектральної компоненти, n - номер частоти, N_k - кількість спектральних компонент, N_T - кількість частот.

Реалізації оцінок математичних сподівань для спектральних компонент наведено на рис. 7.

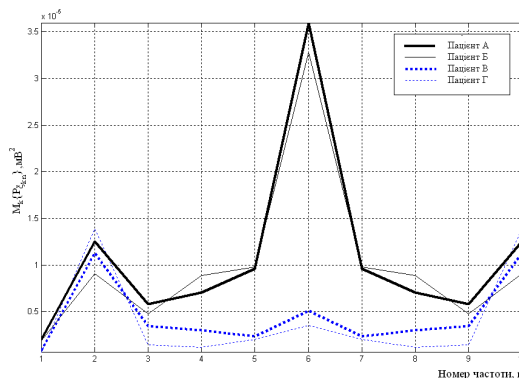


Рисунок 7 – Усередненні значення спектральних компонент за частотами

У результаті порівняльного аналізу ознак ЕРС на базі стаціонарної моделі та розробленої моделі відзначимо, що для першої моделі ознаки лежать у межах норми, тобто пацієнти А та Б (рис.6,а,б та рис. 7) вважаються здоровими, а для другої моделі відзначається зміна ознак (що свідчить про зміни в стані сітківки ока людини). При дослідженні пацієнтів В та Г (рис.6,в,г та рис. 7) з патологією типу центральна дегенерація сітківки ока людини картина спостерігається аналогічна, як і для норми.

Основні ознаки для норм і патологій є незмінними, а проявляються лише додаткові, що не відповідають за роботу зорового аналізатора (наприклад, за емоційний чи фізичний стан людини в момент дослідження).

Отже, дослідивши електроретиносигнал за розробленим методом, отримано інформативні ознаки сигналу (спектральні компоненти) (рис. 7), які є інваріантними у часі, і поряд з тим виявляють локалізацію розподілу потужності сигналу на певних частотах. Отримані інваріанти показують однорідність властивостей сигналу, і поряд з тим зміни, за характером і значеннями яких можна оцінити стан сітківки ока, а також діагностувати зміни її функціонування.

Висновки

У результаті аналізу ЕРС розробленим методом отримано нові в області діагностики стану сітківки ока інформативні ознаки електроретиносигналу - спектральні компоненти, які фактично відповідають функціональному стану сітківки ока людини. Результати досліджень дають змогу застосувати розроблений метод для медичної діагностики зорової системи на ранніх стадіях її захворювання.

Література

1. Юзьків А.В., Яворський Б.І. Математичне моделювання електроретинографічних сигналів // Вісник ТДТУ, том 2, 1997. – С.39-45.
2. Мацюк О.В. Система для діагностики захворювань зорового аналізатора: Автореф. дис.канд.техн.наук: 05.11.16 / Нац. авіац. ун-т. – Київ, 2001. – 17 с.
3. Паламар М.І. Комп'ютерні вимірювальні системи для дослідження біопотенціалів зорового аналізатора: Автореф. дис...канд.техн.наук: 05.11.05 / Нац. ун-т „Львівська політехніка”. – Львів, 1998. – 17 с.
4. Драган Я.П., Осухівська Г.М., Хвостівський М.О. Обґрунтування математичної моделі електроретинографічного сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів: УАД. – 2007. № 18. – С. 129-138.
5. Хвостівський М.О. Математична модель електроретинографічного сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу // Матеріали Одинадцяті наукової конференції Тернопільського державного технічного університету ім.І.Пулюя (Тернопіль, 16-17 травня 2007 р.). – Тернопіль: ТДТУ, 2007. – С. 15.
6. Драган Я. Енергетична теорія лінійних моделей стохастичних сигналів: – Львів, Центр стратегічних досліджень еко-біо-технічних систем, 1997. –XVI+333с.
7. Хвостівський М.О., Гевко О.В., Шадріна Г.М. Імітаційна модель електроретиносигналу на основі періодично корельованого випадкового процесу // Вісник Тернопільського державного технічного університету – Тернопіль: ТДТУ ім. І.Пулюя, – 2007. №4. – С. 157-164.

Одержано 11.04.2008 р.