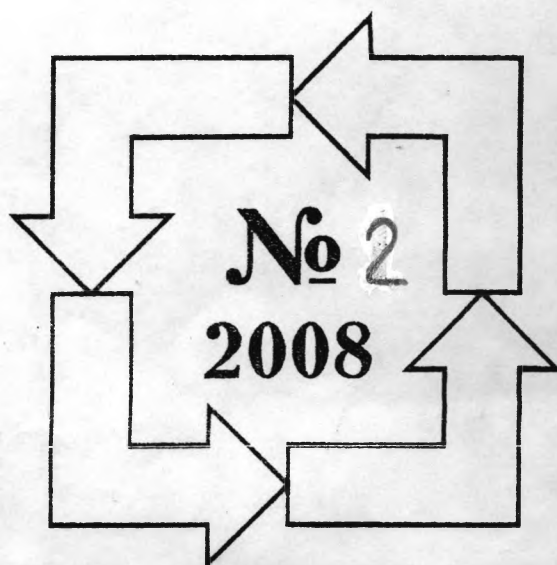


МІЖНАРОДНИЙ  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ  
ЖУРНАЛ

ВИМІРЮВАЛЬНА  
ТА  
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА  
ТЕХНІКА  
В  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПРОЦЕСАХ

**20-річчю**  
кафедри  
**РАДІОТЕХНІКИ**  
Хмельницького  
національного  
університету  
**ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ**



## МЕТОД ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРОРЕТИНОСИГНАЛУ ТА ОЦІНЮВАННЯ ВІРОГІДНОСТІ ЇЇ РЕЗУЛЬТАТУ

*Анотація.* Для вирішення проблеми автоматизації процедур офтальмодіагностики розроблено метод визначення характеристики оптимального оброблення електроретиносигналу. Метод побудовано на базі лінійної, стохастичної математичної моделі електроретиносигналу. Означено характеристики вірогідності отриманої оцінки електроретинограми. Наведено результати комп'ютерного моделювання.

## METHOD OF BUILDING OF ELECTRORETINOSIGNAL OPTIMAL PROCESSING AND ESTIMATION OF CONFIDENCE OF ITS RESULT

*Summary.* For resolving a problem of automation of ophthalmology diagnostic procedures the method of estimation of optimal processing characteristics for electroretinosignals has been developed. The method has been built on the base of the linear stochastic mathematical model of an electroretinosignal. The characteristics of confidence of the electroretinogram estimation are definite. Results of computing simulation are given.

### Вступ

Для оцінювання функціонального стану зорового нерву та макулярної зони застосовують електроретинограми (ЕРГ) — зареєстрований відібраний зі сітківки ока та опрацьований електричний потенціал (електроретиносигнал — ЕРС), викликаний світловим подразненням сітківки [1].

Означення та методи визначення параметрів ЕРГ регламентовано у стандартах. У стандартах також зафіксовано і рекомендовано до застосування практично напрацьовані методи побудови ЕРГ, відбору та реєстрації ЕРС, а також значимі для практики морфологічні параметри ЕРГ (часові інтервали між характерними її точками, її амплітуди тощо). У медичних методиках регламентовано й методи застосування результатів аналізу ЕРГ для діагностики [1, 2].

Труднощі ранньої діагностики глаукоми привели до вивчення застосування ЕРГ при значних коливаннях тиску всередині ока. Проте результати цих досліджень суперечливі та дискусійні. Значна кількість публікацій у цьому напрямі єдиної думки про цінність ЕРГ для глаукоми не стверджується і висловлюється думка, що необхідними є більш детальні, точніші ЕРГ [3].

Стандартні методи опрацювання (обробки) ЕРС базується на їх представленні стохастичною, стаціонарною, лінійною математичною моделлю [1, 2, 4, 5]. На базі такої моделі застосовують оцінки моментів функції густини розподілу ймовірностей досліджуваних процесів (як правило, ними є математичні сподівання та дисперсії), або кореляційні функції чи функції спектральної густини потужності цих процесів [6-7]. Раніше було досліджено концепцію математичного моделювання та побудовано математичні моделі зорових викликаних потенціалів (ЗВП — потенціалів, що реєструються на мозку при світловому подразненні сітківки ока, зокрема, й на самій сітківці) на базі адитивної суміші лінійного випадкового процесу, зокрема, з безмежно подільними функціями розподілів імовірності, та детермінованого тренду [8-10]. В рамках цієї концепції було досліджені методи представлення: тренду — ортогональними поліноміальними (Чебишова) та функціональними (Фур'є) розкладами, стаціонарної випадкової послідовності — лінійним випадковим процесом. На практиці знаходять застосування й інші моделі та методи опрацювання ЕРС. У

кожному з різноманіття застосувань електроретинографії вибір методу обробки ЕРС, оцінки та трактовки цих результатів носить евристичний характер.

У даній статті розроблено метод побудови ЕРГ шляхом оптимальної обробки експериментального ЕРС, представленого випадковим процесом, та метод оцінювання вірогідності отриманої таким чином ЕРГ. Характеристику оптимальної обробки побудовано з врахуванням морфологічних (амплітудно-часових) параметрів заданої зразкової (еталонної) ЕРГ. Оцінку вірогідності ЕРГ означено як ймовірність її належності до класу зразкових ЕРГ при заданій ймовірності хибного її віднесення до цього класу. Дослідження виконано на базі комп'ютерної симуляції.

## 1. Побудова електроретинограми

Відбір ЕРС  $x(t)$  зі сітківки ока виконується за схемою, наведеною на рис.1 [9].

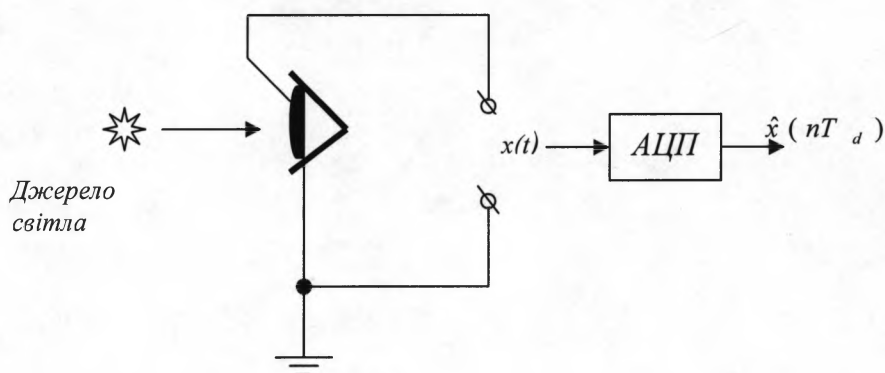


Рисунок 1. Схема відбору ЕРС

Під час відбору електропотенціал  $x(t)$  сітківки через біопідсилювач подається на АЦП, де піддається дискретизації у часі з частотою дискретизації  $f_d = 1/T_d$  та кодуванню двійковим кодом отриманих дискретних значень потенціалу з рівнем квантування (вагою молодшого розряду)  $c = X/2^{r-1}$ , де  $X$  — динамічний діапазон зміни потенціалу,  $r$  — кількість розрядів двійкового коду „знак-модуль”. Через відповідний інтерфейс коди  $\hat{x}(nT_d)$  поступають (наприклад, через COM-порт, USB-порт тощо) у комп'ютер, де він записується у файл, піддається подальшій обробці. На рис. 2 наведено ЕРГ  $s_n, n = \overline{1, N}, N=256$ , побудовану на базі зісканованої з наведеної в [3, рис.1] ЕРГ.

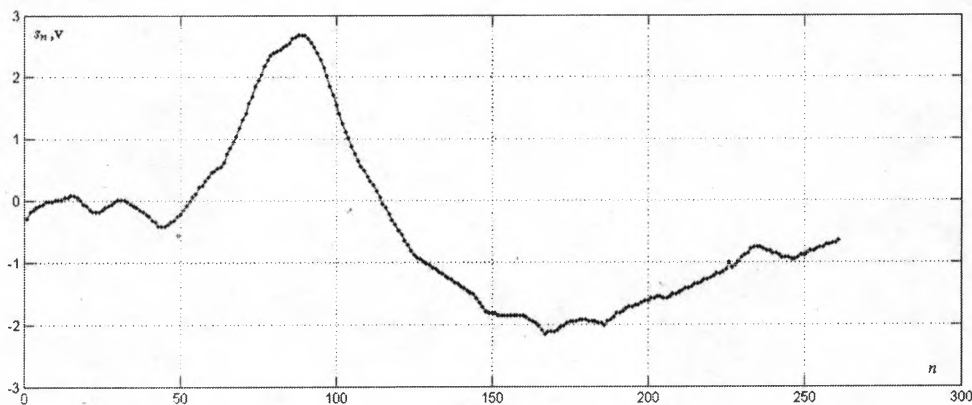


Рисунок 2. Графік зразкової ЕРГ

Ця ЕРГ вважатиметься зразковою, отриманою з ЕРС шляхом його АЦП з вхідним біопідсилювачем з верхньою частотою рівномірної АЧХ 30 Гц та коефіцієнтом підсилення  $10^4$ ;  $n=12, f_d=500$  Гц,  $c=15$  мВ [9].

## 2. Моделі електроретиносигналу та електроретинограми

При дослідженні за модель ЕРС застосовано адитивну суміш послідовностей:

$$x_n = s_n + \eta_n, \quad (1)$$

де  $x_n \propto \hat{\sigma}(nT_d)$ ,  $\eta_n = \eta_n^1 + \eta_n^2 + \dots + \eta_n^m$  — сумарний шум, компонентами якого є шуми, спричинені нерівномірністю освітлення, світловим фоном, процесом відбору тощо;  $s_n$  — корисний сигнал, оцінку  $\hat{s}_n$  якого вважатимемо за ЕРГ. Графік ансамблю з десяти ЕРС (1) наведено на рис. 3. При цьому за  $s_n$  взято відліки ЕРГ, наведеної на рис. 2, а за шум  $\eta_n$  застосовано дискретну випадкову послідовність з нормальною функцією густини розподілу ймовірностей її значень (з нульовим математичним сподіванням та дисперсією рівною одиниці, функція *normrnd* з Matlab).

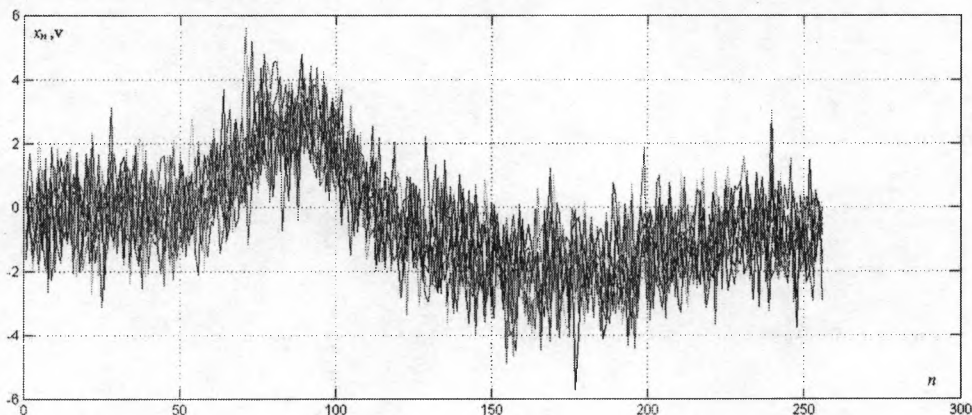


Рисунок 3. Графік ансамблю ЕРС

ЕРГ та ЕРС є заспокоюючими коливаннями. Тобто, ЕРГ адекватно змодельовується функцією, що є розв'язком лінійного неоднорідного (неоднорідність — функція-модель світлового збурення) диференціального рівняння 2-го порядку з постійними коефіцієнтами [11]. Оскільки оцінювання ЕРГ здійснюється обчислювальними методами, то представимо її розв'язком відповідного диференціального різницевого рівняння

$$b_2 s_{n-2} + b_1 s_{n-1} + s_n = \xi_n, n = \overline{0, N}, \quad (2)$$

де  $\xi_n$  — математична модель світлового збурення сітківки, значення коефіцієнтів  $b_1$ ,  $b_2$  та початкові значення  $s_{-1}$ ,  $s_{-2}$  визначають параметри ЕРГ (амплітуди хвиль, швидкість їх заспокоєння). Значення  $s_n$  обчислюватимемо за алгоритмом, який випливає з рівняння (2). На рис. 3 наведено блок-схему [11] обчислювальної моделі ЕРГ та ЕРС.

Коефіцієнти  $b_1$  і  $b_2$ , початкові умови  $x_{-1}, x_{-2}$  та значення  $N$  вибираються такими, щоби побудована на основі математичної моделі послідовність  $\hat{s}_n$  була близькою до послідовності  $s_n$ :

$$\underset{\forall \{b_1, b_2, x_{-1}, x_{-2}, N\}}{\operatorname{argmin}} K(s, \hat{s}), \quad (3)$$

де  $K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_n - \hat{s}_n)^2}$  — критерій близькості. Процедуру вибору параметрів виконано методом простого, направленою перебору. Граничні значення коефіцієнтів та початкових умов, крок їх зміни вибирався евристично, зі застосуванням розрахункових залежностей між коефіцієнтами  $b_1$  і  $b_2$ , початковими умовами  $x_{-1}, x_{-2}$  та параметрами послідовності  $s_n$  — заданої (стандартної) ЕРГ.

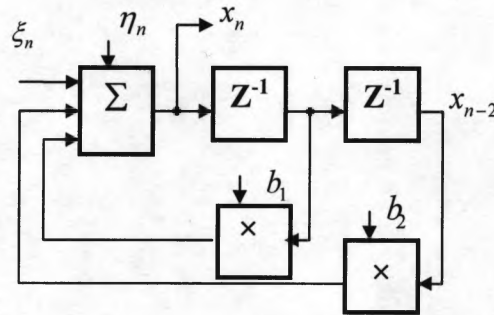


Рисунок 4. Блок-схема обчислювальної моделі ЕРГ ( $\eta_n = 0, n = \overline{0, N}$ ) та ЕРС

Період дискретизації ЕРС узгоджено з шириною смуги частот його спектральної густини потужності.

### 3. Оцінювання електроретинограми за електроретиносигналом

З принципу взаємності випливає, що при подаванні на вхід схеми рис.3 ЕРС  $x_n$  на її виході отримаємо оцінку ЕРГ  $\hat{s}_n$  (за умов, що  $\eta_n = 0, n = \overline{0, N}$ , а параметри обчислювальної моделі є оптимальними для ЕРГ  $s_n$ ).

На рис.5 наведено графіки оцінки ансамблю ЕРС, отриманого після оптимальної обробки (узгодженим фільтром, рис. 4).

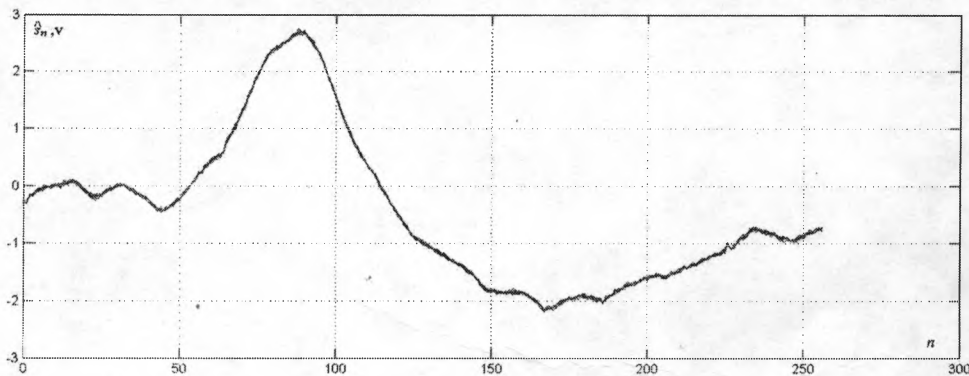


Рисунок 5. Графіки ансамблю ЕРС після оптимальної обробки

Дисперсія середньої спектральної густини потужності оптимально обробленого ЕРС завжди менша за відповідну дисперсію необробленого ЕРС. Тому дисперсію середньої спектральної густини потужності оптимально обробленого зразкового ЕРС застосовано за граничне значення для дисперсії (поріг) середньої спектральної густини потужності так само обробленого деякого експериментального ЕРС при виборі рішення про тип ЕРГ. Крім того, уможливується побудова сімейства графіків залежності

ймовірності достовірного віднесення від величини цієї дисперсії при заданих ймовірностях хибності такого віднесення.

#### 4. Вірогідність результатів оцінювання електроретинограми

Для детермінованого ЕРС ймовірність відтворення вірогідної ЕРГ теоретично дорівнює одиниці (оцінкою якості цього відтворення буде його точність, величина якої визначається адитивною сумішшю методичної, інструментальної, стохастичної тощо її складових).

Для стохастичного ЕРС ймовірність відтворення вірогідної ЕРГ відрізняється від одиниці залежно від степені адекватності математичної моделі ЕРС, а звідси й методу відтворення з нього ЕРГ, до самого ЕРС. Величину цієї вірогідності оцінюватимемо ймовірністю відхилення відтвореної ЕРГ у межах заданої точності при заданій ймовірності хибного вибору ЕРГ з похибкою, яка перевищує задану величину (відповідно вимогам стандарту [12], на базі статистичної теорії вибору рішень, теорії виявлення сигналів). При цьому застосуємо окремий випадок критерію середнього ризику вибору рішення — критерій Неймана-Пірсона. За аргумент цього критерію необхідно вибрати таку характеристику оцінки ЕРГ, яка є її метричним інваріантом до зсуву по часовій осі чи до номеру експерименту. Для ЕРС, як стохастичного, стаціонарного процесу таким інваріантом є його спектральна густина потужності, або, зокрема, його середня потужність. Оскільки результати визначення середньої потужності для зразкового (еталонного) ЕРС чи для відповідної йому оцінки ЕРГ при статистичних випробуваннях також є стохастичними, то аргумент критерію Неймана-Пірсона побудовано як комплекс з моментів функції густини розподілу ймовірностей значень середньої потужності. Для гаусових функцій густини розподілу ймовірностей цей комплекс будуватимемо з математичного сподівання, дисперсії чи середньоквадратичного відхилення середньої потужності так, щоби дотриматися практично потрібної (медичної) його інтерпретації.

Спектральні густини потужностей ЕРС обчислювалися за допомогою *psd*-функції Matlab.

У даній роботі вибір ЕРГ виконано шляхом порівняння дисперсії оцінки середньої, спектральної густини потужності з її деяким пороговим значенням  $\nu$ , що визначається за заданою величиною ймовірності  $P_f$  того, що цей вибір хибний. Порогові значення  $\nu$  дисперсії оцінок спектральної густини потужності для визначення ймовірності  $P_d$  рішення того, що оцінка ЕРГ вірогідна для заданих ймовірностей  $P_f$  знайдено за значеннями дисперсії  $D_0$  середньої повної потужності еталонного (навчального) ЕРС:

$$\nu = \sqrt{D_0} \Phi^{-1}(P_f) + M_0, \quad (4)$$

де  $\Phi(t) = \int_{-\infty}^t \exp(-t^2/2) dt$  — інтеграл ймовірності,  $M_0$  — середнє значення

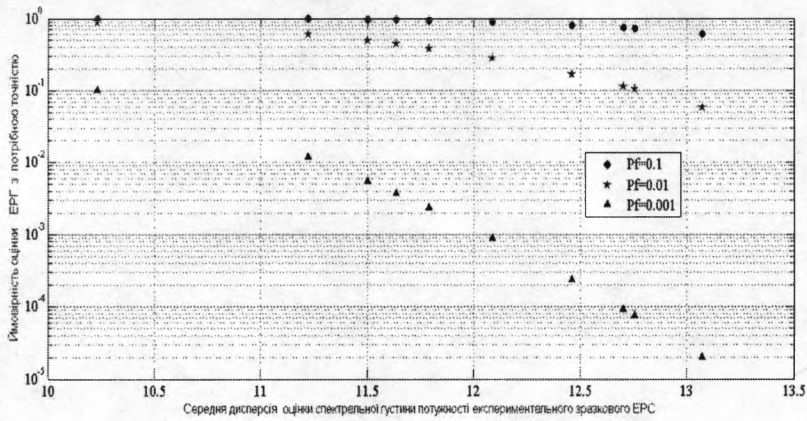
математичного сподівання. Для відповідних обчислень застосовано функцію *norminv* з Matlab; функція розподілу оцінки середньої повної потужності еталонного ЕРС припускалася гаусовою.

Оцінки ймовірності рішення того, що відтворена ЕРГ вірогідна при різних дисперсіях оцінки спектральної густини потужності визначалися за виразом:

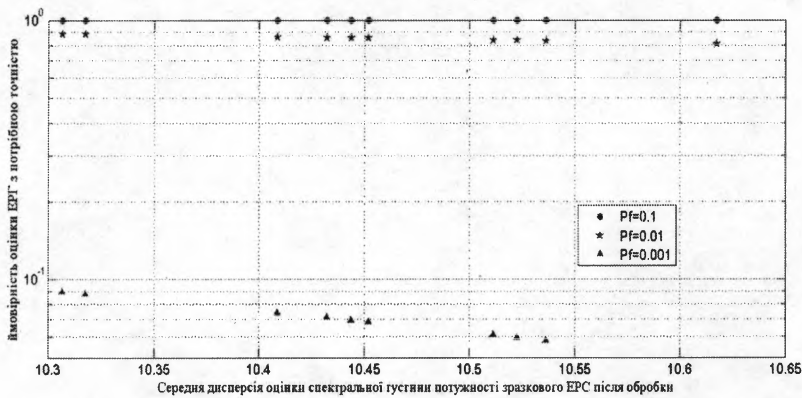
$$P_d = 1 - \Phi\left(\frac{\nu - M_\gamma}{V_\gamma}\right), \quad (5)$$

де  $M_\gamma$  та  $V_\gamma$  — математичне сподівання і дисперсія середньої густини потужності експериментальної ЕРГ (для обчислень застосовано функцію Matlab *normcdf*).

На рис. 6 наведено сімейства графіків відповідних ймовірностей вибору рішення про вірогідність відтвореної ЕРГ.



(а)



(б)

Рисунок 6. Сімейства графіків ймовірності вибору рішення, що відтворена ЕРГ вірогідна при заданих ймовірностях їх хибності (а — необроблений ЕРС, рис. 3, б — після оптимальної обробки ЕРС, рис. 5; вісь ординат логарифмічна)

Отриманий від оптимальної обробки виграш оцінюється за порівнянням сімейств графіків: або за збільшенням ймовірності при заданій середній дисперсії середньої спектральної густини потужності, або за збільшенням цієї дисперсії при заданій ймовірності — при фіксованих ймовірностях хибних рішень. Цей виграш збільшується зі збільшенням точності розв'язання задачі (3) та при збільшенні відхилення експериментальної ЕРГ від зразкової. На рис. 7 наведено сімейство графіків, аналогічних до графіків, наведених на рис. 6, для ЕРГ з артефактом, графік якої наведено на рис. 8.

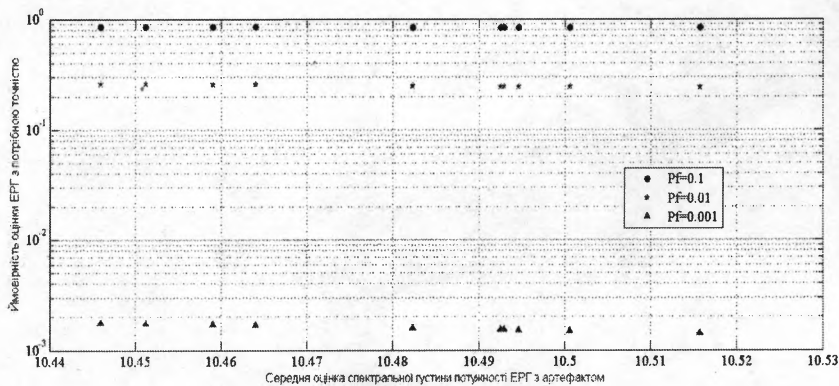


Рисунок 7. Графіки ймовірності вибору ЕРГ з артефактом

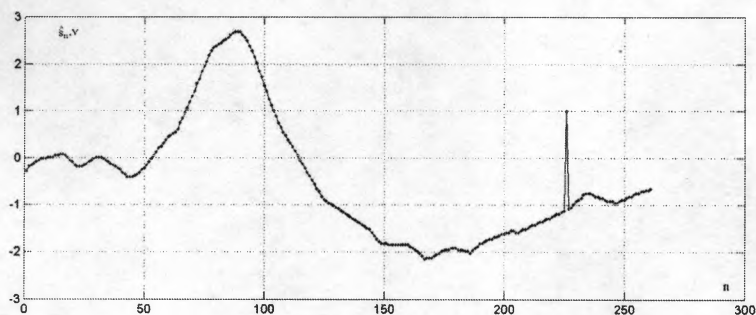


Рисунок 8. ЕРГ з артефактом

З порівняння графіків рис. 6 та рис. 7 видно, що ймовірність того, що ЕРГ рис. 8 є зразковою (рис. 2, рис. 5) менша.

**Висновки.** Застосування узгодженої зі зразковою ЕРГ фільтрації експериментального ЕРС уможливує визначення вірогідності оцінки експериментальної ЕРГ внаслідок чого уможливується: а) автоматизація вибору рішення про адекватність оцінки експериментальної ЕРГ до зразкової ЕРГ та б) автоматичне чи інтерактивне визначення морфологічних параметрів оцінки експериментальної ЕРГ з підвищеною точністю. При інтерактивному застосуванні ретинографічної системи підвищиться точність визначення параметрів оцінки експериментальної ЕРГ за рахунок зменшення методичної та стохастичної складових похибки.

### Література.

1. Шамшинова А.М., Волков И.И. Функциональные методы исследования в офтальмологии.- М.: Медицина, 1999.- 415 с.
2. Miyake et al. ISCEV Standard for Clinical Electroretinography.- [iscev.org/standards](http://iscev.org/standards)
3. Казарян А.А. Паттерн-ретинограмма и глаукома // Глаукома.- №3, 2005.- С. 62-65
4. Wu C.-F., Wong F. Frequency Characteristics in the Visual System of *Drosophila* // The Journal of General Physiology Vol.69, 1977, pp. 705-724
5. De Lange, H. Research into dynamic nature of the human fovea-cortex system with intermittent and modulated light// J. opt. SOC. Am. 48, 1958, pp.77-784
6. Blake I.F., Thomas J.B. The Linear Random Process// Proceedings of the IEEE.- v. 56.- No 10, 1968.- pp. 1696-1703
7. Марченко Б.Г., Щербак Л.Н. Линейные стохастические процессы и их приложения.- К.: Наукова думка, 1973.- 192 с.
8. Ткачук Р.А. Фриз М.Є. Математична модель спонтанної електроенцефалограми в задачах офтальмодіагностики по зорових викликаних потенціалах//Вісник ТДТУ імені Івана Пулюя.- №2, 1997.- С. 17-25.
9. Marchenko V.G., Tkachuk R.A., Palamar M.I. Harmonic analysis using in human visual system diagnosis by means of electroretinograms identification// Pattern recognition and information processing.- Minsk, 1997.- v.1.- pp. 207-213
10. Marchenko V.G., Tkachuk R.A., Palamar M.I. Computing measuring system for biopotentials of visual analyzer investigations//International Conference Instrumen IEHS-96.- St.Petersburg.30.10-2.11.1996.-s114-115.
11. Юзьків А.В., Яворський Б.І. Математичне моделювання електроретинографічних сигналів//Вісник ТДТУ імені Івана Пулюя.- № 2, 1997.- С. 40-45
12. МИ 187-86, МИ 188-86 Достоверность и требования к методикам поверки средств измерения.- М.: Издательство стандартов, 1987.- 39 с.

Дослідження виконувалися за темами ВК-2006, номер держреєстрації 0200U001720, та ДІ 90-01, номер держреєстрації 0101U003426.