

## СИНТЕЗ ФІЛЬТРУ КАЛМАНА ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО ЕЛЕКТРОРЕТИНОСИГНАЛУ

*Вдосконалено метод визначення коефіцієнтів фільтру Калмана, при опрацюванні низькоінтенсивного електроретиносигналу, у квантові («фотонні») електроретинографії, для задачі виявлення ризиків нейротоксикації (виявлення нейротоксикантів, оцінювання їх типу, кількісних характеристик, часу впливу, тощо), шляхом застосування методу перебору у декілька ітерацій, із зміною кроку. На основі визначених коефіцієнтів, синтезовано фільтр Калмана для опрацювання низькоінтенсивного квантового електроретиносигналу. Проведено порівняння часу роботи алгоритму визначення коефіцієнтів методом прямого направлено перебору, та алгоритму удосконаленого пошуку із змінним кроком перебор. Змодельовано низькоінтенсивний квантовий електроретиносигнал, на основі стандартного електроретиносигналу. Проведено опрацювання змодельованого квантового електроретиносигналу удосконалим методом визначення коефіцієнтів, що призвело до зменшення часу пошуку коефіцієнтів у 120 разів, та зменшення обчислювальної складності алгоритму пошуку. Алгоритм визначення коефіцієнтів шляхом прямого направлено перебору реалізовано в програмному середовищі Matlab.*

*Ключові слова: нейротоксикація, низька інтенсивність, світлове подразнення, квантовий електроретиносигнал, фільтр Калмана, метод прямого направлено перебору, часова складність.*

P.O. TYMKIV, V.P. ZABYTVSKYY, B.I. YAVORSKY

Ternopil National Technical University named after Ivan Pul'uj, Ternopil, Ukraine

### SYNTHESIS KALMAN FILTER TO PROCESS OF LOW ENERGY ELECTRORETINOSIGNAL

*Abstract – The method of determining the coefficient Kalman filter, the processing of low electroretinosignal in quantum ( "photonic") electroretinography for problem detection risk neurotoxic (identifying neurotoxin, evaluating type of neurotoxic, quantitative characteristics, exposure time, etc.), by applying the method busting in several iterations, a change of step.*

*On the basis of certain factors, synthesized Kalman filter to process low-quantum electroretinosignal. Comparison of time determination of algorithm coefficients yentiv by direct-directional sorting, and improved search algorithm with variable step-busting. Low energy quantum electroretinosignal simulated based on standard electroretinosignal.*

*A study simulated the quantum electroretinosignal improved method for determining the factors that led to a decrease in search time coefficient 120 times, and reducing the computational complexity of the search algorithm. The algorithm determining factors addressed by direct enumeration implemented in software environment Matlab.*

*Keywords: neurotoxic, low intensity light stimulation, quantum electroretinosignal, Kalman filter, method directly addressed busting, time complexity.*

### Вступ

Для оцінювання ризику нейротоксикації людини (виявлення нейротоксикантів, оцінювання їх типу, кількісних характеристик тощо) міжнародними інституціями рекомендовано використання електроретинографії (отримання потенціалу відгуку ока (електроретиносигнал, ЕРС) при його подразненні світлом) [1]. Встановлено, що при цьому необхідно забезпечити водночас значно більші за стандартні роздільну здатність та швидкість отримання результату електроретинографічного дослідження, що досягається зниженням інтенсивності енергії світлового подразнення [2-4].

Око реагує появою електричного потенціалу на подразнення світлом (потік фотонів) з енергією значно меншою від порогу його зорового відчуття [5,6]. Відомі використання цього ефекту у дослідженнях з квантової фізики [7]. Зменшення інтенсивності енергії світлового подразнення  $\xi_k$ ,  $k = \overline{1, K}$  зменшує величину відношен-

ня енергій ЕРС  $s_k$  та шуму  $n_k$  у відібраному від сітківки ока потенціалі  $x_k = s_k + n_k$ , де  $x_k = x(k \Delta t)$ ,  $\Delta t = 1/2f$  – період дискретизації.

Для збільшення відношення вказаних енергій обґрунтовано застосування фільтру Калмана. Для побудови фільтру Калмана необхідна обчислювальна модель сподіваного (априорно відомої оцінки)  $\hat{s}_k$ . За обчис-

ловальну модель ЕРС використано рекурсивну структуру 2-го порядку. Для відомого ЕРС значення її параметрів  $a_1$ ,  $a_2$  знайдено методом послідовного підбору за критерієм мінімум середньоквадратичної похибки (СКП) відтворення ЕРС (як інтегрованої з квадратом функції) [3, 4].

### Постановка задачі

Послідовний підбір параметрів обчислювальної рекурсивної структури 2-го порядку має значну часову складність. В даній роботі наведено результати дослідження можливості зниження обчислювальної складності пошуку коефіцієнтів фільтру Калмана для низькоінтенсивного ЕРС.

Стандартом [8] ретинографічних досліджень регламентовано застосування смугопропускаючого фільтру зі смугою частот (1-200) Гц. Застосування такого фільтру стає малоєфективним для низькоінтенсивної ретинографії. Недостатньо ефективними також фільтри оптимальні за критерієм мінімуму середніх квадратичної, чи абсолютної похибки виділення відомого сигналу з шумів (наприклад, фільтри типу Вінера, Норса) через необхідність їх багатократного переналаштування при фільтрації ЕРС отриманого зі зниженою енергією світлового подразнення.

Фільтр Калмана (рис. 1) є оптимальним за мінімумом коваріації похибки оцінювання ЕРС

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E\{(s_k - \hat{s}_k)(s_{k-1} - \hat{s}_{k-1})^T\}, \quad (1)$$

для кожного ЕРС з їх послідовності, отриманої під час попередніх дослідження, оскільки оптимальність ця досягається в автоматизованому режимі для кожного з цих ЕРС окремо. Схему застосування фільтру Калмана наведено на рис.1, де  $\varepsilon_n$  — шум, спричинений нерівномірністю подразнення, фонового освітлення та ін.,  $\eta_n$  — шум відбору ЕРС зі сітківки ока.

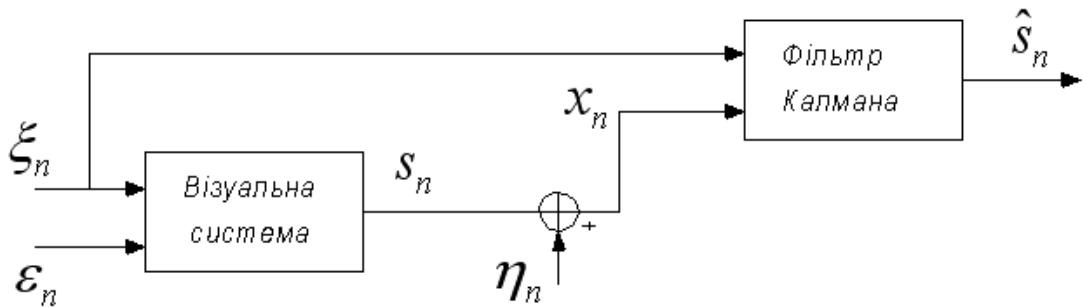


Рис.1. Схеми застосування фільтру Калмана [9] для оцінювання ЕРС [10]

Для оцінювання фільтром Калмана кожного зі значень  $\hat{s}_k$  ЕРС на поточному такті  $k$  використовуються: отримана на попередньому такті  $k-1$ , оцінка вектора  $[\hat{s}_{k-1} \ \hat{s}_{k-2}]$  змінних стану ЕРС, представленого у просторі цих змінних, та матриці стану, входу, виходу. Вказані матриці отримано з обчислювальної моделі ЕРС (рис. 2) — відгуку електричним потенціалом  $s_n$  візуальної системи (рис. 1) [10].

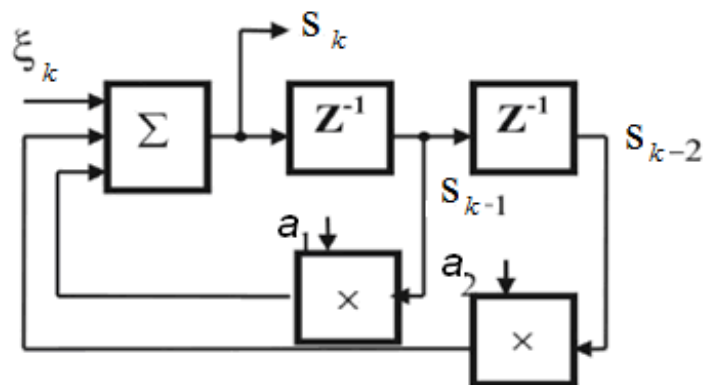


Рис.2. Схеми обчислювальної структури 2-го порядку для моделювання ЕРС ( $\Sigma$  – підсумування з нагромадженням,  $Z^{-1}$  – затримка на один цикл обчислень,  $\times$  — множення; інші позначення в тексті)

### Розв'язання поставленої задачі

Рекурсивна структура 2-го порядку (рис. 2) в кожному циклі  $k=0, 1, 2$ , відображує:

$$a_2 s_{k-2} + a_1 s_{k-1} + s_k = \xi_k, \quad (2)$$

де  $s_{-1}, s_{-2}$  — початкові умови.

В [3,4] послідовним підбором коефіцієнтів  $a_1, a_2$ , та початкових умов  $s_{-1}, s_{-2}$  оцінюється близькість змодельованого ЕРС  $\hat{s}_k$  до відомого ЕРС  $s_k$  (наприклад, з бази даних) за значенням критерію

$$\kappa = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (s_k - \hat{s}_k)^2} \quad (3)$$

де  $N$  — кількість значень  $s_k$  та  $\hat{s}_k$ . Складність такого методу оцінювання параметрів моделі

$$C = n_{a_1} \cdot n_{a_2} \cdot n_{s_{-1}} \cdot n_{s_{-2}} \cdot n_{\tau}, \quad (4)$$

де  $n_{\bullet}$  — кількість значень, відповідно, коефіцієнтів  $a_1, a_2$ , початкових умов  $s_{-1}, s_{-2}$ , та відліків ЕРС. Значення чисел  $n_{\bullet}$  залежать від величини значення заданого критерію (3) та визначаються, наприклад, кількістю молодших розрядів  $m_{\bullet}$  двійкових кодів відповідних коефіцієнтів, початкових умов та кількістю  $\tau$  відліків ЕРС. Звідси, складність методу є експоненціальною, типу  $O(2^M)$ , де  $M = m_{a_1} + m_{a_2} + m_{s_{-1}} + m_{s_{-2}} + m_{\tau}$ , що викликає необхідність в удосконаленні методу параметричного синтезу обчислювальної моделі реакції сітківки ока на подразнення світловим стимулом.

В стандартній електроретинографії застосовують світлове подразнення в межах  $(0,01-30) \text{ Кд} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$  [8], при цьому отримують типовий електроретиносигнал (наприклад, у [11], рис.3.). При зниженні енергії подразнення, наприклад до рівня  $(10^{-3} - 10^{-4}) \text{ Кд} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$  [5,6,12], отримують квантовий електроретиносигнал (наведений на рис.3) – КЕРС [13].

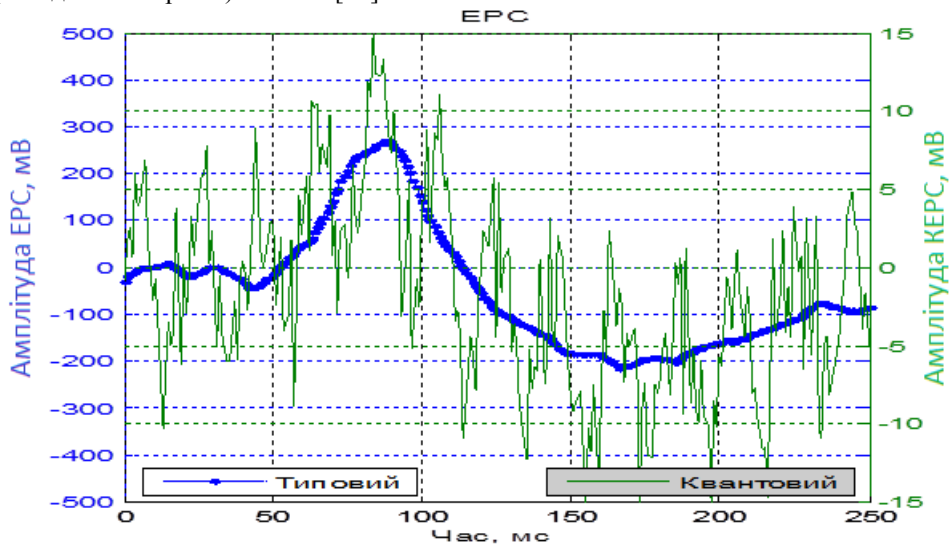


Рис. 3. Порівняльна ілюстрація ЕРС та КЕРС

При визначенні коефіцієнтів математичної моделі КЕРС у вигляді рекурсивної структури 2-го порядку запропонованої у [3, 4] використано метод прямого направленого перебору. Цей метод полягає у фіксуванні одного з елементів перебору (наприклад коефіцієнту  $a_1$ ) і послідовній зміні іншого елемента (наприклад коефіцієнту  $a_2$ ) у певних межах, з наперед визначеним кроком нарощування  $\Delta$ . Внаслідок цього отримуємо змодельовані ЕРС у кількості значень  $a_2$ . На наступному етапі задається коефіцієнт  $a_1 + \Delta$ , і знову проводиться перебір коефіцієнтів  $a_2$ . Результатом прямого направленого перебору коефіцієнтів буде двовимірний масив модельованих ЕРС розміром  $[a_1 \ a_2]$ . Для підвищення точності, крок перебору  $\Delta$ , необхідно вибирати якнайменшим. Проте перебір з малим кроком призводить до збільшення часу виконання, а, отже, до збільшення обчислювальної складності.

Для типових методів визначення параметрів фільтру (наприклад, всередовищі Matlab у інтерфейсі користувача Filter Design and Analysis Tool), необхідно попередньо задати параметри фільтру (тип, порядок, частота зрізу та ін). Оскільки при обробці КЕРС, апріорні параметри фільтру не відомі, то для його опрацювання КЕРС вирішено використати ІІР-фільтр з функцією передачі:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (5)$$

де  $b$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – коефіцієнти фільтру. Визначення коефіцієнтів функції передачі проведено шляхом прямого направленого перебору. Межі перебору значень коефіцієнтів фільтру вибирались із умов стійкості фільтру (розміщення полюсів у межах одиничного кола). Перебір виконувався виходячи з умов  $a_1 \in (-2, 2)$  та  $a_2 \in (|a_1| - 1, 1)$ . Діапазон значень коефіцієнту  $a_2$  визначався з формули:

$$a_2 = (|a_1| - 1) \cdot (1 - v) + v, \quad (6)$$

де  $v$  – визначник коефіцієнту  $a_2$ ,  $v \in (0, 1)$ . Тобто діапазон значень  $a_2$  є функцією двох змінних (рис.4.).

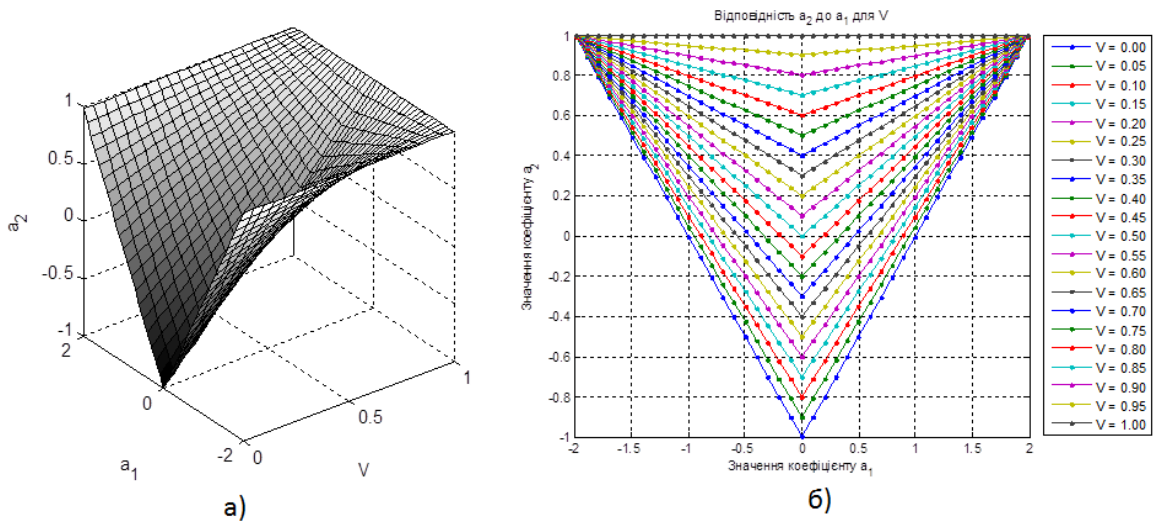


Рис. 4. Відповідність значень коефіцієнта  $a_2$  значенням коефіцієнта  $a_1$  та визначника  $v$ : а – просторове представлення, б – представлення на площині

Функція передачі (2) за формою амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) реалізує смуговий фільтр, а на резонансних частотах, близьких до нульової частоти та частоти Найквіста  $f_n$  може реалізувати фільтр низьких та високих частот відповідно (рис. 5).

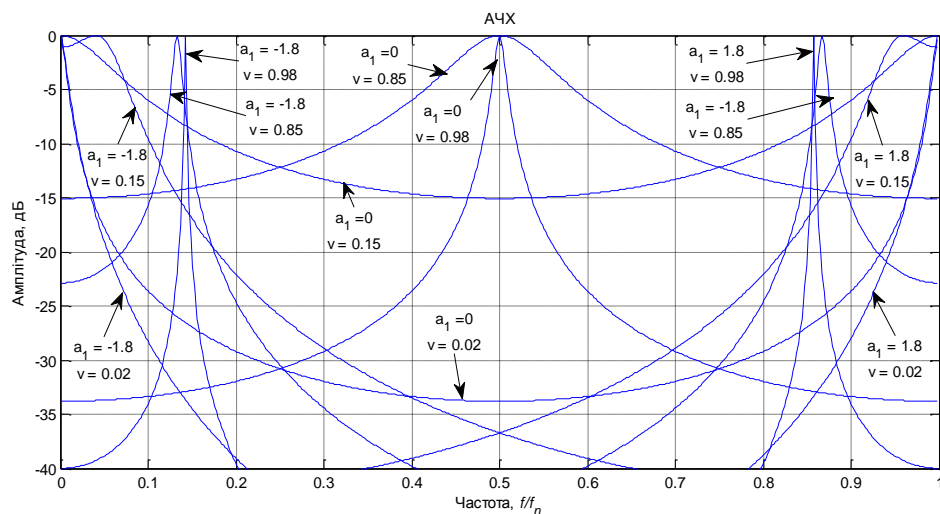


Рис. 5. Сімейство кривих АЧХ для різних значень  $a_1, v$ .

Характеристика оптимальної обробки та коефіцієнти фільтру визначаються за мінімумом похибки середньоквадратичного відхилення відфільтрованого КЕРС (оцінки)  $\hat{s}(n)$  від еталонної квантової електроретинограми – КЕРГ  $s(n)$ :

$$\arg \min_{(a_1, a_2) \in \mathbb{R}} K(C, \kappa), \quad (7)$$

де

$$\kappa = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (s(n) - \hat{s}(n))^2}, \quad (8)$$

тут  $K$  – критерій оптимальності параметрів фільтру, мінімум середньоквадратичної похибки (СКП),  $a_1, a_2$  – коефіцієнти обчислювальної рекурсивної структури 2-го порядку.

Обчислення СКП при переборі значень з малим кроком потребує значних обчислювальних затрат, тобто зростає обчислювальна складність  $C$ :

$$C = \Theta(n_{a_1} \cdot n_{a_2} \cdot n_{S_{k-1}} \cdot n_{S_{k-2}} \cdot n_{\tau}), \quad (9)$$

де  $n_{a_1}$  – кількість значень коефіцієнту  $a_1$  при переборі,  $n_{a_2}$  – кількість значень коефіцієнту  $a_2$  при переборі,  $n_{S_{k-1}}$  – кількість значень параметру  $S_{k-1}$  при переборі,  $n_{S_{k-2}}$  – кількість значень параметру  $S_{k-2}$  при переборі,  $n_{\tau}$  – кількість значень  $\tau$  при переборі.

Для зменшення обчислювальної складності перебір виконано у декілька ітерацій із зміною кроку та звуженням діапазону значень  $a_1$  та  $v$  на кожній наступній ітерації:

$$\begin{aligned} a_1^{k+1} &\in [\hat{a}_1^k - \Delta a, \hat{a}_1^k + \Delta a], & \Delta a &= \frac{p \cdot (2 - |\hat{a}_1^k|)}{k} \\ v^{k+1} &\in [\hat{v}^k - \Delta v, \hat{v}^k + \Delta v], & \Delta v &= \begin{cases} p \cdot \hat{v}^k / k, & \hat{v}^k < 0.5 \\ p \cdot (1 - \hat{v}^k) / k, & \hat{v}^k \geq 0.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

де  $k$  – номер ітерації;  $\hat{a}_1^k, \hat{v}^k$  – значення коефіцієнту  $a_1$  та визначника  $v$  відповідно, знайдені для  $K$ ;  $p$  – коефіцієнт околу  $\hat{a}_1^k, \hat{v}^k$ ,  $p \in (0, 1]$ . Значення коефіцієнтів в кожній ітерації розраховується за допомогою поділу діапазону еквідистантними відрізками. Кількість ітерацій та кроків діапазону задаються фіксовано. Алгоритм визначення коефіцієнтів шляхом прямого направленного перебору реалізовано в програмному середовищі Matlab. Результати роботи програми із імітованим КЕРС (див. рис.3) представлені на рис.7. Ознакою коректності роботи програми є:

- замкнута крива ізоліній на останній ітерації,
- подібність АЧХ фільтру до спектру еталонного КЕРС.

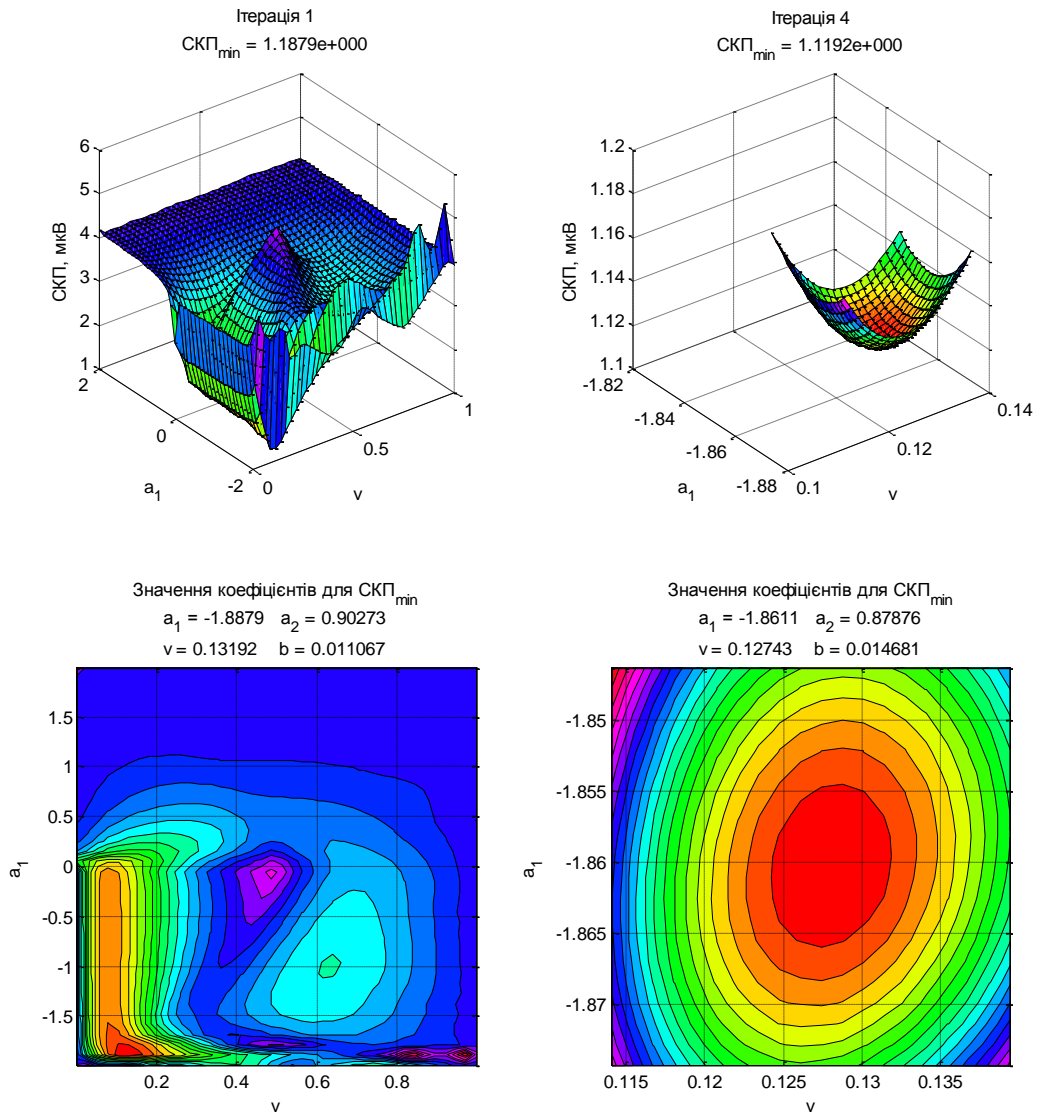


Рис. 6. Ілюстрація СКП при переборі коефіцієнтів.

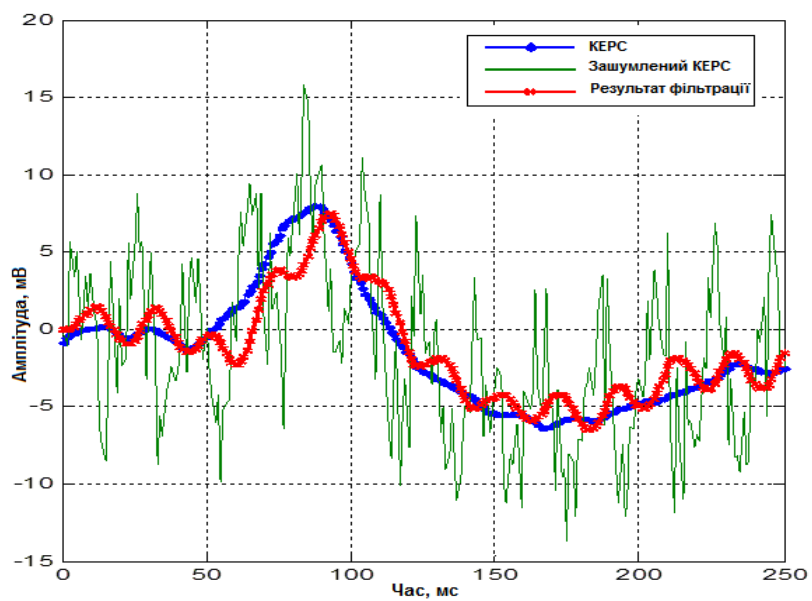


Рис.7. Результати опрацювання квантового електроретинографічного сигналу із визначеними коефіцієнтами

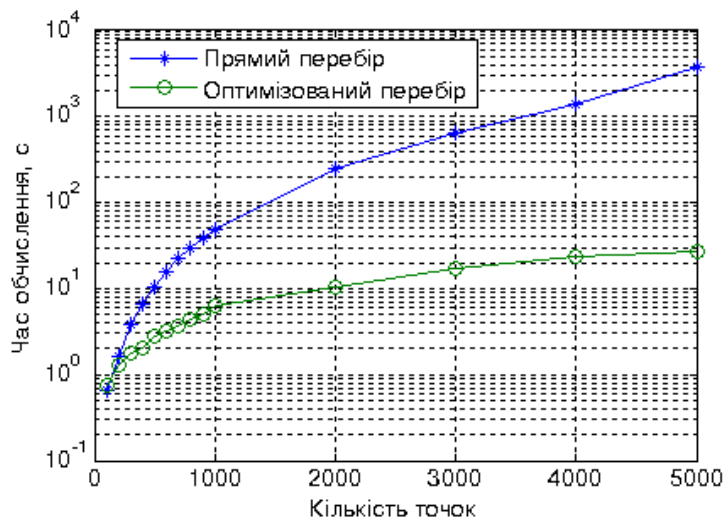


Рис.8. Час роботи алгоритмів перебору коефіцієнтів для опрацювання КЕРС (напівлогарифмічна шкала)

При порівнянні обчислювальної складності алгоритму прямого направленного перебору і алгоритму перебору у декілька ітерацій із зміною кроку перебору, виявлено зменшення часу перебору коефіцієнтів фільтру у 120 разів за інших однакових умов (рис.8.).

### Висновок

1. Підвищення точності, роздільної здатності та зменшення інвазивності електроретинографії вимагає зниження енергії світлового подразнення аж до квантового рівня.
2. Для опрацювання відібраного квантового електроретиносигналу, оптимізовано застосування обчислювальної рекурсивної структури 2-го порядку за критерієм мінімуму обчислювальної складності, та удосконалено метод прямого направленного перебору.
3. Перебір коефіцієнтів здійснюється у декілька ітерацій зі зміною кроку перебору, що дозволило зменшити обчислювальну складність алгоритму, скоротити час обчислень у 120 разів за інших однакових умов.

Дослідження виконувалися за темою ВК-32-11, номер державної реєстрації 0111U002593

### Література

1. Environmental Health Criteria 223. Neurotoxicity Risk Assessment For Human Health: Principles And Approaches [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: – <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc223.htm>
2. Ткачук Р.А. Підвищення ефективності біотехнічних систем для активних біомедичних досліджень / Ткачук Р.А., Цуприк Г.Б., Яворський Б.І. // Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів: тези доповіді. – Київ, 15-19 жовтня 2012.– С.145
3. Ткачук Р.А. Оптимізація ретинографічної системи для виявлення прихованого біологічного впливу на організм людини / Р.А. Ткачук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 2. – С. 145-152.
4. Ткачук Р. Метод побудови біотехнічної системи для оцінювання електроретинограм з підвищеними вірогідністю та ефективністю / Р. Ткачук, Б. Яворський // Вісник ТДТУ. – 2009. – Том 14. – № 3. – С. 102-110.
5. Ткачук Р.А. Устройство возбуждения сетчатки глаза для фотонной электроретинографии / Р.А.Ткачук, Б.И. Яворский // 20-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2010. – С. 128 – 133.
6. Necht S. Energy, Quanta and Vision / S. Necht // Journal of General Physiology. – 1942, July 20. P. 819 – 840.

7. Brunner N. Detection of Weak Optical Signals by the Human Visual System: Perspectives in Neuroscience and in Quantum Physics / N. Brunner, Ch. De Balthazar, R. Alvarez // Electrical Neuromaging Group, HUG, Geneva. – 2008. – 12p.
8. ISCEV 118:60-77 // Springer-Verlag. – 2008.– С. 9.
9. Ткачук Р. А. Оптимальна обробка електроретиносигналу для визначення форми електроретинограми / Р.А. Ткачук // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2009. – № 70. – С. 9 – 13.
10. Franklin, G.F. *Digital Control of Dynamic Systems* / G.F. Franklin, J.D. Powell, and M.L. Workman. — Second Edition: Addison-Wesley. – 1990. – 850p.
11. Казарян А.А. Паттерн-ретинограмма и глаукома/ А.А.Казарян // Офтальмология. – 2005. – № 3. – С. 62–65.
12. D. Finkelstein. Human electroretinogram near the absolute threshold of vision / Finkelstein D., Gouras P., Hoff M. – Investigative Ophthalmology. – 1963, April. – Volume 7. – Number 2.– P. 214-218.
13. Тимків П.О. Використання закону Вебера-Фехнера в квантовій електроретинографії/ П.О. Тимків, Б.І. Яворський // Телемедицина – досвід та перспективи: тези доповіді на VIII міжн. конф. – Донецьк, 19-20.03.2012. С. 108-110.

#### Reference

1. Environmental Health Criteria 223. Neurotoxicity Risk Assessment For Human Health: Principles And Approaches: – <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc223.htm>
2. Tkachuk R.A. Pidvuschennja efektyvnosti biotekhnichnyh system dlja actyvnyh biomedychnyh doslidjen' / R.A. Tkachuk, H.B. Tsupryk, B.I. Yavorsky // Obroblennja sygnaliv i zobrajen' ta rozpoznavannja obraziv: tezy dopovidi. – Kyiv, 15-19 zhovtnja 2012.– p.145. [in Ukrainian].
3. Tkachuk R.A. Optymizatsia retynographichnyh system dlja vyjzvlennja pryhovanogo biologichnogo vplyvuna organizm ljudyny / R.A. Tkachuk // Optyko-electronni informatsijno-energetychni tehnologii. – 2009. – № 2. – pp. 145-152. [in Ukrainian].
4. Tkachuk R. Metod pobudovy biotekhnichnoi systemy dlja otsinjyvannja electroretynogram z pidvyschenoj virohidnistju ta efektyvnistju// R. Tkachyk, B. Yavorsky, Visnyk TDT. – 2009. – Vol. 14. – № 3. – pp.102-110. [in Ukrainian].
5. Tkachuk R.A. Ustrojstvo vzbuzhdenja setchatki glaza dlja fotonnoj electroretinografii / R.A. Tkachuk, B.I. Yavorsky // 20-ja Mezhdunarodnaja konferentsia «SVCH-tehnika i telecommunitionnye tehnologii». – 2010. – pp. 128 – 133. [in Ukrainian].
6. Hecht S. Energy, Quanta and Vision / S. Hecht // Journal of General Physiology. – 1942, July 20. pp. 819 – 840.
7. Brunner N. Detection of Weak Optical Signals by the Human Visual System: Perspectives in Neuroscience and in Quantum Physics / N. Brunner, Ch. De Balthazar, R. Alvarez // Electrical Neuromaging Group, HUG, Geneva. – 2008. – 12p.
8. ISCEV 118:60-77 // Springer-Verlag. – 2008.– С. 9.
9. Tkachuk R.A. Optymal'na obrobka electroretinosygnaly dlja vyznachenja formy electroretynogamy / R.A. Tkachuk // Vymirjyval'na tehnika ta metrologia. — 2009. – № 70. – pp. 9 – 13. [in Ukrainian].
10. Franklin, G.F. *Digital Control of Dynamic Systems* / G.F. Franklin, J.D. Powell, and M.L. Workman. — Second Edition: Addison-Wesley. – 1990. – 850p.
11. Kazaryan A.A. Pattern-retinograma i glaucoma / A.A. Kazaryan // Oftal'mologija. – 2005. – № 3. – pp. 62–65. [in Russian].
12. D. Finkelstein. Human electroretinogram near the absolute threshold of vision / Finkelstein D., Gouras P., Hoff M. – Investigative Ophthalmology. – 1963, April. – Volume 7. – Number 2.– P. 214-218.
13. Tymkiv P.O. Vykorystannja zakonu Vebera-Fehnera v kvantovij electroretunografii / P.O. Tymkiv, B.I. Yavorsky // Telemedytsyna – dosvid ta perspektivy: tezy dopovidi na VIII mizhn. CONF. – Donetsk, 19-20.03.2012. pp. 108-110. [in Ukrainian].