**УДК 004.94 : 519.876.5**

М. Є. ФРИЗ, М. А. СТАДНИК
Тернопільський національний технічний університет

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОКАНАЛЬНОГО УСТАЛЕНОГО ЗОРОВОГО ВИКЛИКАНОГО ПОТЕНЦІАЛУ В ЗАДАЧАХ РОЗРОБКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОФТАЛЬМОДІАГНОСТИКИ

*На основі фізіології зорової системи людини, а саме будови її зорового тракту, обґрунтовано математичну модель двоканального усталеного зорового викликаного потенціалу у вигляді двовимірного лінійного періодичного випадкового процесу, що також враховує циклічність спричинену періодичною світловою стимуляцією. Здійснено аналіз існуючих математичних моделей зорових викликаних потенціалів та виявлено питання, що не були раніше вирішені. Розглянуто інформаційну технологію офтальмодіагностики на основі усталених зорових викликаних потенціалів. Доведено періодичність математичного сподівання та кореляційної функції запропонованої математичної моделі.*

*Ключові слова: усталений зоровий викликаний потенціал, імпульс, кореляційна функція, лінійний випадковий процес, математична модель, математичне сподівання*

M. YE. FRYZ, M. A. STADNYK
Ternopil National Technical University

## MATHEMATICAL MODEL OF THE TWO-CHANNEL STEADY-STATE VISUAL EVOKED POTENTIAL IN THE DEVELOPING PROBLEMS OF THE OPHTHALMOLOGICAL INFORMATION TECHNOLOGIES

*Abstract - Based on the physiology of the human visual system, such as the structure of the optic tract, the mathematical model of two-channel steady-state visual evoked potential as a linear periodical random process is justified. This model takes into account cyclicality caused by periodic light stimulation. The analysis of existing mathematical models of visual evoked potentials is made and identified problems that were not previously solved. The ophthalmological information technology based on the steady-state visual evoked potentials is described. The periodicity of the mathematical expectation and correlation function of the proposed mathematical model are proved.*

*Keywords: steady-state visual evoked potential, impulse, correlation function, linear random process, mathematical model, mathematical expectation*

## Вступ

Електричну активність мозку поділяють на фонову електроенцефалограму (активність мозку в стані спокою) та викликані потенціали, що виникають під дією зовнішнього подразнення. Зоровий викликаний потенціал (ЗВП) – це реакція зорової системи на світлову стимуляцію. В залежності від частоти подразнення викликані потенціали поділяють на фазові (transient, 1–4 Гц) та усталені (steady-state, 5–30 Гц).

На рисунку 1 зображено реалізацію усталених ЗВП, зареєстрованих відповідно із двох каналів $O_1$ та $O_2$ (згідно з міжнародною системою 10-20), що розташовані над проекціями зорових відділів мозку людини. Спостерігати періодичність та взаємозв'язок між даними зареєстрованими із різних каналів є неможливо, оскільки, представлені реалізації є зашумленими фоновою електричною активністю мозку. Внаслідок цього, офтальмологи також використовують програмні комплекси із вбудованими попередніми методами обробки сигналу для подальшого визначення характеристик: латентності негативних і позитивних компонент, максимумів, мінімумів (візуальна діагностика), кореляції.

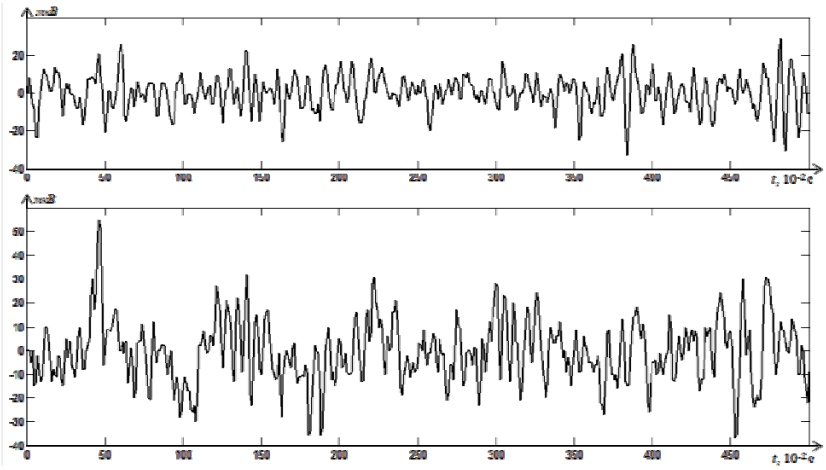

**Рис.1. Реалізації усталених ЗВП зареєстрованих відповідно із каналів $O_1$ та $O_2$ (частота стимуляції 10 Гц)**

Все частіше в офтальмологічній практиці використовуються ЗВП для оцінки великого комплексу зорових захворювань [1, 2] за допомогою нових інформаційних технологій, що дозволяють зберегти шаблони та досліджуваний сигнал для подальшої діагностики, здійснити оцінку за допомогою відомих

методів обробки сигналів та в автоматичному режимі визначити діагноз. Науковці звернули свою увагу на достатньо нову сферу застосування такого типу сигналу для оцінки взаємозв'язку між прогресування психічних захворювань (епілепсія, шизофренія) та тенденцією до втрати зору за допомогою усталених ЗВП [3]. Важливим застосовуванням ЗВП у нейрофізіології є інтраопераційний моніторинг при видаленні пухлин мозку, що розташовані поряд або в тісному контакті із зоровим аналізатором людини (зоровий нерв, зорові відділи кори мозку), та післяопераційна діагностика [4]. Широке застосування такий тип сигналу також знайшов і у нейро-комп'ютерному інтерфейсі.

Використання ЗВП для будь-яких цілей, описаних у попередньому абзаці, перш за все вимагає детального його опису за допомогою математичної моделі, яка би відображала біофізичну суть досліджуваного явища і була б придатною для використання у комп'ютерній діагностиці. Актуальність побудови адекватної математичної моделі усталених ЗВП є значною і продовжує зростати із виявленням нових сфер застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

На даний час найпростішою моделлю, яку використовували науковці для опису ЗВП ще на початках розвитку дослідження та виявлення такого типу сигналу, є адитивна модель. До її складу входить дві компоненти: одна з них – детермінована функція ("корисний" ЗВП) та центрований слабостаціонарний випадковий процес (фонова ЕЕГ). Основним недоліком адитивної моделі є те, що із її використанням дослідник зможе оцінити лише першу моментну функцію, що є недостатньо для дослідження складного сигналу типу ЗВП. Проте, адитивна модель використовуються і надалі у сучасних інформаційних технологіях, оскільки дозволяє здійснити усереднення на множині постстимульних реалізацій сигналу [5].

Більш розширеною у порівнянні із адитивною моделлю є компонентна, що складається із кількох компонент в залежності від кількості окремих джерел електричної активності мозку. Основним принципом цієї моделі є те, що кількість джерел є значно більша за кількість електродів, за допомогою яких виконується запис електричної активності. Для визначення складових науковці використовують уже давно відомі методи головних та незалежних компонент [6]. Недоліком компонентної моделі є те, що в результаті її застосування дослідник отримає набір компонент, до кожної з яких для подальшого застосування потрібно підібрати модель та відповідні методи обробки. Дана особливість підвищує обчислювальну складність комплексу, у якому застосовуватиметься компонентна модель.

Сфера застосування штучних нейронних мереж є достатньо великою і також охоплює сигнали типу ЗВП та ЕЕГ. Недоліками цієї моделі є, перш за все, неврахування стохастичності сигналу та достатньо тривалий час навчання для досягнення оптимальних вагових коефіцієнтів, а також розподіл вхідних даних є невідомим [6].

Внаслідок того, що зростає зацікавленість та розширення сфери застосування усталених ЗВП сигналів, що породженні циклічною світловою стимуляцією, науковці для опису такого типу сигналу використовують стохастично-періодичний випадковий процес [7]. Ймовірнісні характеристики цієї моделі є періодичними функціями від часу. Така властивість є дуже зручною для опису випадкових періодичних процесів, яким є усталений ЗВП. Основним недоліком моделі стохастично-періодичного випадкового процесу є те, що вона не враховує процес біофізичного генерування сигналу окремими нейронами, що є дуже важливо при використанні усталених ЗВП у офтальмодіагностиці, нейрофізіології.

У монографії [8] автори використовують лінійний випадковий процес (ЛВП) як математичну модель ЗВП сигналу. ЛВП враховує стохастичність досліджуваного сигналу, дозволяє оцінити моментні та кумулянтні функції вищих порядків і враховує процес генерування електричної активності окремими нейронами. Результуючий сигнал автори представляють як суму кусково-стаціонарного ЛВП та детермінованої функції, що відображає корисний ЗВП. Незважаючи на усі переваги і вирішені проблеми, дана модель не враховує циклічності подання стимулів, а сигнал досліджує на інтервалах стаціонарності, які також необхідно додатково знайти чи обґрунтувати. Варто також зауважити, що ЛВП успішно застосовується в задачах математичного моделювання та статистичної обробки циклічних стохастичних сигналів різної природи [9,10].

Різноманіття математичних моделей, що використовуються для опису ЗВП, доводить те, що дослідження такого типу сигналу є актуальним і на теперішній час. Проте, кожен дослідник на основі поставлених для нього завдань намагається підібрати якнайкраще математичну модель чи удосконалити раніше створену.

**Постановка завдання**

Авторами статті [2] було обґрунтовано математичну модель зорових викликаних потенціалів у вигляді лінійного випадкового процесу та експериментально досліджено адекватність її використання на основі зареєстрованих даних. Ця модель враховувала: циклічні властивості усталених ЗВП, зумовлених ритмічністю фотостимуляції; стохастичність ЗВП [11]; вплив різних параметрів на ймовірнісні характеристики сигналів; механізм генерування сигналу окремими нейронами; можливість визначення інформаційно-діагностичних параметрів, що відображають біофізичну суть досліджуваного процесу; можливість використання в задачах офтальмодіагностики та комп'ютерного імітаційного моделювання.

Основним завданням даної статті є обґрунтоване удосконалення раніше побудованої математичної моделі із врахуванням стохастичного взаємозв'язку між каналами реєстрації електричної активності, що дозволить більш точно і в комплексі описати механізм генерації ЗВП і в подальшому здійснити якіснішу

діагностику. Вирішення цього завдання призводить до виконання наступних підзадач, а саме:

- дослідження впливу джерел електричної активності мозку, що реєструються за допомогою одного каналу, на інші собі подібні;
- детальний математичний опис досліджуваного процесу;
- оцінювання ймовірнісних характеристик для перевірки адекватності використання удосконаленої моделі.

**Інформаційна технологія офтальмодіагностики на основі усталених ЗВП**

Першим етапом роботи технології є реєстрація усталених ЗВП, для якого використовувався електроенцефалограф DX-NT-32 (виробництво DX-Complex, м. Харків), структура схема якого зображена на рис.2. Електроди, попередньо змочені фізіологічним розчином накладаються на голову людини згідно міжнародної системи 10-20. Для реєстрації ЗВП необхідно установити їх над проекцією зорових відділів мозку людини (позиції $O_1$ та $O_2$), як зображено на рис.2, а референтний електрод на переніссі. Оскільки, для реєстрації усталеного ЗВП при частоті стимуляції 10 Гц використовується два електроди, тому відповідно отримаємо двоканальну реалізацію сигналу для подальшої обробки.

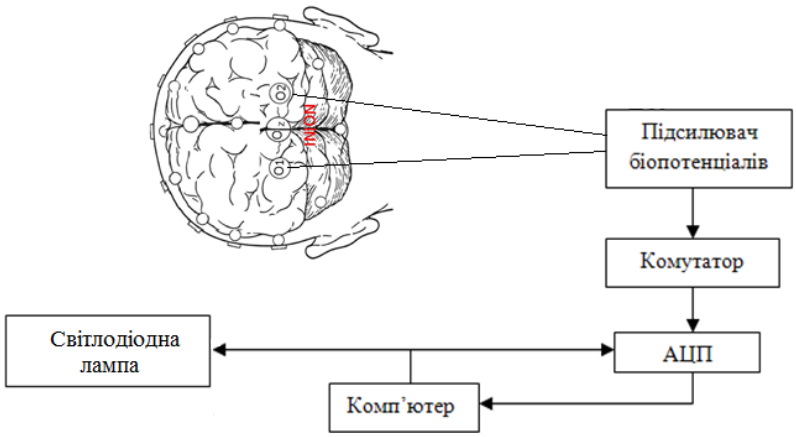


**Рис.2. Структурна схема системи для реєстрації сигналу типу ЗВП [12]**

Підсилювачі потенціалів призначені для підсилення відведених за допомогою електродів сигналів та їх аналогової фільтрації. У комплексі, на якому здійснювалися дослідження, використовуються підсилювачі із наступними характеристиками: вхідний опір – 20МОм, коефіцієнт дискримінації синфазної завади – 100 дБ, частотний діапазон – 0,05–70 Гц. За допомогою комутатора сигнали із підсилювача почергово підключаються до аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), що здійснює їх дискретизацію по часу (частота 100 Гц) та квантування по рівню (10 біт). Світлова стимуляція зорової системи відбувається за допомогою трьох світлодіодних лампочок із різними частотами подання (1–30 Гц). Дуже важливо, щоб початок реєстрації кожної постстимульної реалізації сигналу синхронізувався за допомогою комп'ютера із подачею стимулу.

Після реєстрації інформаційна технологія офтальмодіагностики на основі зареєстрованих сигналів типу ЗВП повинна включати: ідентифікацію діагностичних параметрів, їх статистичне оцінювання та методи прийняття діагностичних рішень. Для виконання цих завдань важливо побудувати адекватну математичну модель досліджуваного сигналу.

**Обґрунтування математичної моделі двоканального усталеного ЗВП**

Для реєстрації ЗВП можна використовувати декілька каналів запису. Внаслідок цього отримуємо набір сигналів, отриманих із кожного електроду, що розташований над зоровими відділами мозку. Такий підхід дозволить підвищити якість діагностики, адже буде враховувати зареєстровану інформацію із декількох джерел зорової активності мозку і дозволить оцінювати взаємозв'язок між ними.

Для кращого розуміння процесу формування сигналу типу ЗВП, який отримаємо після реєстрації із кожного електрода, розглянемо рис. 3, який ілюструє процес проходження імпульсів по нервовому волокні у мозку людини.

Основною особливістю роботи зорової системи є те, що після фотостимуляції імпульси надходять по зорових нервах від кожного ока людини окремо, а лише в зоровому перехресті відбувається обмін імпульсами для покращення обробки зорової інформації мозком. Як бачимо з рис. 3, сигнал, зареєстрований над проекцією правого зорового

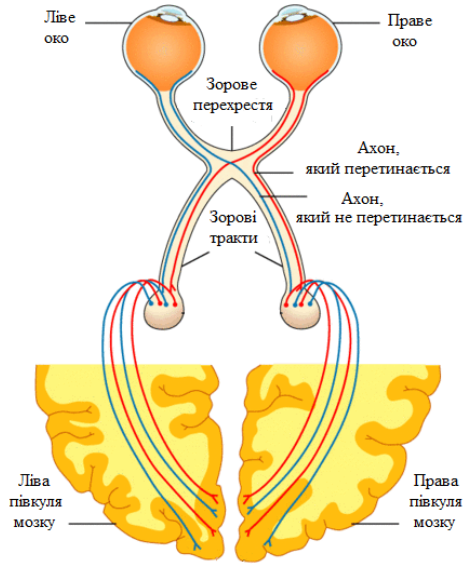


**Рис.3. Схематичне зображення зорового тракту [12]**

відділу мозку, буде містити сигнал переданий не лише із правого ока, але і із лівого (зорові тракти різного кольору). Тобто, після фотостимуляції лише одного ока, корисний сигнал буде зафіксований на двох електродах, розміщених на позиціях $O_1$ та $O_2$, а не тільки на одному. Таку важливу особливість необхідно врахувати при побудові математичної моделі усталених ЗВП.

Позначимо випадковий процес, який реєструється за допомогою першого електрода (позиція $O_1$), як $\xi_1(t)$ і відповідно другого (позиція $O_2$) – $\xi_2(t)$. Згідно доведень авторів [2] такі випадкові процеси є відповідно сумою великого числа імпульсів, які виникають у випадкові моменти часу і можуть бути зображені у формі ЛВП. На основі цього та із врахуванням структури зорового тракту, результуючий процес $\Xi(t)$, що виникне після стимуляції зорової системи людини і буде зареєстрований за допомогою двох електродів, представимо як двовимірний ЛВП і запишемо у матричному вигляді:

$$\Xi(t) = \begin{pmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \end{pmatrix} \tag{1}$$

Врахувавши фізіологію зорового тракту, зобразимо зареєстровані процеси $\xi_1(t)$ та $\xi_2(t)$ у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \xi_1(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{11}(\tau,t)d\pi_1(\tau) + \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{21}(\tau,t)d\pi_2(\tau), \\ \xi_2(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{12}(\tau,t)d\pi_1(\tau) + \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{22}(\tau,t)d\pi_2(\tau), \end{aligned} \tag{2}$$

де $\varphi_{mn}(\tau,t)$ – ядро ЛВП, невипадкова функція, що представлена виразом [2]:

$$\varphi_{mn}(\tau,t) = A_{mn}e^{-\beta_{mn}(\tau)(t-\tau)}\sin(\omega(\tau)(t-\tau))U(t-\tau),\ m=\overline{1,2},\ n=\overline{1,2}, \tag{3}$$

$A_{mn}(\tau)$ – невипадкова функція, що характеризує амплітуду імпульсу;

$\beta_{mn}(\tau)$ – невипадкова функція, що характеризує коефіцієнт затухання імпульсу;

$\omega(\tau)$ – невипадкова функція, що характеризує частоту імпульсу;

$U(s)$ – функція Хевісайда;

$\pi_k(\tau),\ \tau \in (-\infty,\infty),\ k=\overline{1,2}$, $\mathbf{P}\{\pi_1(0)=0\}=1$ – узагальнений неоднорідний пуассонівський процес.

Елементи двовимірної моделі (1) і відповідно процесів (2) мають таку інтерпретацію:

- $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{11}(\tau,t)d\pi_1(\tau)$ – описує суму великого числа імпульсів, що виникають у правій частині зорового тракту після стимуляції правого ока і передаються у праву частину зорової кори.
- $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{12}(\tau,t)d\pi_1(\tau)$ – описує суму великого числа імпульсів, що виникають у правій частині зорового тракту після стимуляції правого ока і передаються у ліву частину зорової кори.
- $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{21}(\tau,t)d\pi_2(\tau)$ – описує суму великого числа імпульсів, що виникають у лівій частині зорового тракту після стимуляції лівого ока і передаються у праву частину зорової кори.
- $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{22}(\tau,t)d\pi_2(\tau)$ – описує суму великого числа імпульсів, що виникають у лівій частині зорового тракту після стимуляції лівого ока і передаються у ліву частину зорової кори.

Введемо вектор породжуючого процесу:

$$\Pi(\tau) = \begin{pmatrix} \pi_1(\tau) \\ \pi_2(\tau) \end{pmatrix}, \tag{4}$$

а також матрицю ядер ЛВП елементів двовимірної моделі (1):

$$\Phi(\tau,t) = \begin{pmatrix} \varphi_{11}(\tau,t) & \varphi_{12}(\tau,t) \\ \varphi_{21}(\tau,t) & \varphi_{22}(\tau,t) \end{pmatrix} \tag{5}$$

Тоді двовимірний лінійний випадковий процес $\Xi(t)$ (1) можна подати у наступному вигляді:

$$\Xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\tau,t)d\Pi(\tau) \tag{6}$$

Згідно означення поданого у роботі [13], випадковий процес (6) є лінійним випадковим процесом із матричним ядром $\Phi(\tau,t)$ і двовимірним породжуючим процесом $\Pi(\tau)$.

На основі наукових робіт, теорій електрогенезису [1, 7, 11] та використовуючи теореми про періодичність опубліковану в [14] було обґрунтовано та експериментально підтверджено (на основі реальних даних) періодичність одновимірної математичної моделі усталених ЗВП у формі періодичного ЛВП. Згідно вище написаного, одновимірний процес $\xi(t)$ є лінійним *T*-періодичним випадковим процесом за Слуцьким і відповідно будь-яка *m*-вимірна характеристична функція такого процесу є *T*-періодичною за сукупністю своїх часових аргументів [14]. На основі цього, будемо стверджувати, що процес $\Xi(t)$ (1) є також періодичним випадковим двовимірним процесом, оскільки його складові є періодичними випадковими процесами із періодом *T,* що дорівнює періоду стимуляції зорового аналізатора [1]. Перевіримо правильність наших міркувань, обґрунтувавши періодичність математичного сподівання та кореляційної функції процесу $\Xi(t)$.

Математичне сподівання одновимірної складової процесу (1) запишемо у наступному вигляді, використавши одне із зображень (2):

$$\mathbf{M}\xi_1(t)=\mathbf{M}\sum_{k=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{1k}(\tau,t)d\pi_k(\tau)=\sum_{k=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{1k}(\tau,t)da_k(\tau), \tag{7}$$

де $a_k(\tau)=\mathbf{M}\pi_k(\tau)$ – математичне сподівання приростів породжуючого процесу (4).

Скориставшись твердженням, поданим у [11], стосовно періодичності ядра ЛВП $\varphi_{1k}(\tau,t)=\varphi_{1k}(\tau+T,t+T)$ (ядро ЛВП є періодичним, оскільки невипадкові функції, що характеризують частоту та коефіцієнт затухання імпульсу є періодичними) та математичного сподівання приростів породжуючого процесу $da_k(\tau)=da_k(\tau+T)$, що виникає внаслідок циклічної світлової стимуляції, запишемо наступне:

$$\mathbf{M}\xi_1(t)=\sum_{k=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{1k}(\tau+T,t+T)da_k(\tau+T)=\sum_{k=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{1k}(\tau,t+T)da_k(\tau)=\mathbf{M}\xi_1(t+T) \tag{8}$$

На основі зображення (8) математичне сподівання процесу (1) є періодичним і у матричному вигляді його можна зобразити у наступній формі:

$$\mathbf{M}\Xi(t)=\begin{pmatrix}\mathbf{M}\xi_1(t)\\ \mathbf{M}\xi_2(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\mathbf{M}\xi_1(t+T)\\ \mathbf{M}\xi_2(t+T)\end{pmatrix}=\mathbf{M}\Xi(t+T) \tag{9}$$

Зобразимо кореляційну функцію процесу (1) у матричному вигляді:

$$R_{\Xi}(\tau,t)=\begin{pmatrix}R_{11}(t_1,t_2) & R_{12}(t_1,t_2)\\ R_{21}(t_1,t_2) & R_{22}(t_1,t_2)\end{pmatrix}, \tag{10}$$

де $R_{mn}(t_1,t_2)=\mathbf{M}(\overset{\circ}{\xi}_m(t_1)\overset{\circ}{\xi}_n(t_2))$ – математичне сподівання добутку центрованих випадкових процесів у моменти часу $t_1$ та $t_2$. $R_{11}(t_1,t_2)$ та $R_{22}(t_1,t_2)$ – автокореляційні функції відповідних випадкових процесів $\xi_1(t)$ та $\xi_2(t)$.

$\overset{\circ}{\xi}_n(t)$ – центрований випадковий процес, який представлено у наступному вигляді:

$$\overset{\circ}{\xi}_n(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{n1}(\tau,t)d\overset{\circ}{\pi}1(\tau)+\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{n2}(\tau,t)d\overset{\circ}{\pi}2(\tau)=\sum_{k=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{nk}(\tau,t)d\overset{\circ}{\pi}_k(\tau),\ n=\overline{1,2}, \tag{11}$$

де $\overset{\circ}{\pi}_k(\tau)=\pi_k(\tau)-a_k(\tau)$ – центрований породжуючий процес (4).

Використавши означення кореляційної функції та зображення (11) і виконавши операцію множення центрованих випадкових процесів отримаємо математичний запис для (10):

$$R_{mn}(t_1,t_2)=\sum_{k=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{mk}(\tau,t_1)\varphi_{nk}(\tau,t_2)db_k(\tau), \tag{12}$$

де $b_k(\tau)=\mathbf{D}\pi_k(\tau),\ k=\overline{1,2}$ – дисперсія узагальненого неоднорідного пуасонівського процесу.

Аналогічно до обґрунтування періодичності математичного сподівання доведемо періодичність кореляційної функції процесу (1). Оскільки, про періодичність ядра ЛВП було написано вище і скориставшись твердженням про те, що одновимірна компонента породжуючого процесу (4) є процесом із незалежними *T*-періодичними приростами і через те $db_k(\tau)=db_k(\tau+T)$, тому можемо записати формулу (12) із врахуванням періоду:

$$R_{mn}(t_1,t_2)=\sum_{k=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{mk}(\tau+T,t_1+T)\varphi_{nk}(\tau+T,t_2+T)db_k(\tau+T)=$$

$$=\sum_{k=1}^{2}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi_{mk}(\tau,t_1+T)\varphi_{nk}(\tau,t_2+T)db_k(\tau)=R_{mn}(t_1+T,t_2+T). \quad (13)$$

**Висновки**

Проведено аналіз існуючих математичних моделей зорового викликаного потенціалу та на основі отриманих даних було виявлено питання, які не були раніше вирішенні (врахування циклічності зареєстрованого сигналу, двоканальності ЗВП).

Здійснено опис механізму проходження електричних імпульсів по зоровому тракту людини. На основі особливостей будови зорової системи було побудовано математичну модель усталених ЗВП у вигляді двовимірного лінійного періодичного випадкового процесу.

Обґрунтовано періодичність кореляційної функції та математичного сподівання двовимірного випадкового процесу. У наступних роботах необхідно дослідити характеристики двовимірного лінійного періодичного випадкового процесу і експериментально перевірити адекватність побудованої моделі.

**Література**

1. Steady-state visually evoked potentials: Focus on essential paradigms and future perspectives / F.B. Vialatte, M. Maurice, J. Dauwels, A. Cichocki // Elsevier. – Progress in neurobiology. – № 90. – P. 418–438.

2. Fryz M. Justification of mathematical model of the steady-state visual evoked potential in a form of the linear random process / M. Fryz, M. Stadnyk. – K. : Electronics and control systems. – 2013. – № 1(35). – P. 100–106.

3. Alarcón G., Valentín A. Introduction to epilepsy, Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – P. 217–224.

4. Аникин С.А. Интраоперационный мониторинг зрительных вызванных потенциалов в нейрохирургической практике при удалении опухолей хиазмально-селлярной области / С.А. Аникин, В.Е. Олюшин, Т.Н. Фадеева // Бюллетень сибирской медицины. – 2008. – № 5. – С. 49–54.

5. Davila C. Subspace averaging of steady-state visual evoked potentials / C. Davila, R. Srebo // IEEE transaction on biomedical engineering. – 2000. – №. 47 (6). – P. 720–728.

6. Saeid S., Chambers J. EEG signal processing, Chichester: John Willey & Sons. Ltd., 2007 – 313 p.

7. Стадник М. Статистичний аналіз зорових викликаних потенціалів стійкого стану / Марія Стадник // Матеріали XVI наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя. – 2012. – Т.1. – С. 63.

8. Марченко Б.Г. Математичні моделі й обробка сигналів в офтальмології / Марченко Б.Г., Мацюк О.В., Фриз М.Є. – Тернопіль : В-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2005. – 183 с.

9. Млинко Б.Б. Алгоритм статистичної діагностики на основі реєстрації та аналізу фотоплетизмосигналів / Б.Б. Млинко, М.Є. Фриз // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 4. – С. 176 – 182.

10. Михайлович Т.В. Інформаційна система для імітаційного моделювання водоспоживання Т.В. Михайлович, М.Є. Фриз // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 6. – С. 264–268.

11. Stadnyk M. Mathematical Model of Steady-State Visual Evoked Potential in Problems of Ophthalmological Technologies, Computer Science & Engineering: Proceedings of the 6-th International Conference of Young Scientist (CSE-2013), Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – Electronic edition on CD-ROM. – P. 134–135.

12. Woolsey T. A., Hanaway J., Gado M. The brain Atlas: A Visual Guide to the Human Central Nervous System, 3rd ed., John Willey & Sons. Ltd., 2008 – 272 p.

13. Марченко Б.Г. Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике / Марченко Б.Г. – К. : Наукова думка, 1973. – 191 с.

14. Марченко Б.Г. Лінійні періодичні процеси / Марченко Б.Г. – К. : Праці Інституту електродинаміки НАН України, 1999. – С.172–185.

**References**

1. Vialatte F.-B., Maurice M., Dauwels J., Cichocki A. Steady-state visually evoked potentials: Focus on essential paradigms and future perspectives // Elsevier. – Progress in neurobiology. – Vo.90. – PP. 418-438.

2. Fryz M., Stadnyk M. Justification of mathematical model of the steady-state visual evoked potential in a form of the linear random process // K.: Electronics and control systems. – 2013. – No 1(35).- pp. 100-106.

3. Alarcón G., Valentín A. Introduction to epilepsy, Cambridge: Cambridge University Press, 2012, - pp. 217-224

4. Anikin S.A., Oljushin V.E., Fadeeva T.N. Intraoperacionnyj monitoring zritel'nyh vyzvannyh potencialov v nejrohirurgicheskoj praktike pri udalenii opuholej hiazmal'no-selljarnoj oblasti // Bjulleten' sibirskoj mediciny. – 2008. - № 5. – pp. 49-54. [In Russian]

5. Davila C., Srebo R. Subspace averaging of steady-state visual evoked potentials // IEEE transaction on biomedical engineering. – 2000. – Vo. 47 (6). – PP. 720-728.

6. Saeid S., Chambers J. EEG signal processing, Chichester: John Willey & Sons. Ltd., 2007 – 313p.

7. Stadnyk M. Statystychnyi analiz zorovykh vyklykanykh potentsialiv stiikoho stanu / Mariia Stadnyk// Materialy XVI naukovoi konferentsii TNTU im. I. Puliuia. – 2012. – T.1. – P. 63. [in Ukrainian]

8. Marchenko B. H. Matematychni modeli i obrobka syhnaliv v oftalmolohii / B. H. Marchenko, O. V. Matsiuk, M. Ie. Fryz. – Ternopil: V-vo TDTU im. I Puliuia, 2005..– 183 p. [in Ukrainian]

9. Mlynko B.B., Fryz M.Ie. Alhorytm statystychnoi diahnostyky na osnovi reiestratsii ta analizu fotopletyzmosyhnaliv // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2013. - №4. – pp. 176 – 182. [in Ukrainian]

10. Mykhailovych T.V., Fryz M.Ie. Informatsiina systema dlia imitatsiinoho modeliuvannia vodospozhyvannia // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2013. - №6. – S. 264 – 268. [in Ukrainian]

11. Stadnyk M. Mathematical Model of Steady-State Visual Evoked Potential in Problems of Ophthalmological Technologies, Computer Science & Engineering: Proceedings of the 6-th International Conference of Young Scientist (CSE-2013), Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. –Electronic edition on CD-ROM. – pp. 134-135.

12. Woolsey T. A., Hanaway J., Gado M. The brain Atlas: A Visual Guide to the Human Central Nervous System, 3rd ed., John Willey & Sons. Ltd., 2008 – 272 p.

13. Marchenko B. G. Metod stohasticheskih integral'nyh predstavlenij i ego prilozhenija v radiotehnike / B. G. Marchenko. – K.: Naukova dumka, 1973. – 191 p. [in Russian]

14. Marchenko B. H. Liniini periodychni protsesy /K.: Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy, 1999. – pp.172-185. [in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 26.12.2013 р. Надрукована/Printed :6.2.2014 р.
Рецензент: д.т.н., проф., кафедра комп'ютерних систем та мереж, ТНТУ ім. І. Пулюя, Лупенко С. А.