

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

СТАДНИК МАРІЯ АНДРІЇВНА

УДК 004.41:004.78

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ
АНАЛІЗУ УСТАЛЕНИХ ЗОРОВИХ ВИКЛИКАНИХ ПОТЕНЦІАЛІВ У
ЗАДАЧАХ ОФТАЛЬМОДІАГНОСТИКИ**

05.13.06 – інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Фриз Михайло Євгенович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя,
доцент кафедри комп'ютерних наук.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Стеценко Інна Вячеславівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри автоматизованих систем обробки
інформації і управління,

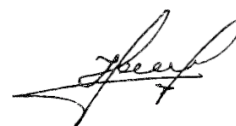
доктор технічних наук, професор
Бойко Іван Федорович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри електроніки, робототехніки і технологій
моніторингу та інтернету речей

Захист відбудеться 11 березня 2020 року о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.06 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий 07 лютого 2020 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради



Н.В. Загородна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дані звіту ВООЗ за 2019 рік щодо стану офтальмологічного здоров'я свідчать про те, що 2.2 мільярдів людей мають порушення зору. Певні захворювання зорової системи є спричиненими прогресуючими психічними захворюваннями (епілепсія, шизофренія), фізичними пошкодженнями мозку, травмами голови, вадами у неконтактних хворих та новонароджених, і не можуть бути ідентифіковані стандартними процедурами та методами офтальмодіагностики. Відповідно, важливою є проблема розробки інформаційної технології (ІТ), яка забезпечить автоматизоване оцінювання функціонального стану зорового аналізатора людини за таких умов. Використання усталеного зорового викликаного потенціалу (ЗВП) – частинного випадку електроенцефалограми (ЕЕГ), що є результатом реакції зорових відділів кори головного мозку на зовнішні стимули (світлові чи просторово-структурні) зі значною частотою подання (5-30 Гц), вважається багатьма авторами найбільш доцільним, що обумовлено меншою чутливістю до артефактів, спричинених морганням, рухом очей та електроміографічним шумом (Celecia G., Vialatte F., Hirsch J., Шагас Ч., Шамшинова А., Шпак А.).

Для аналізу ЗВП в лабораторіях та медичних установах застосовують програмно-апаратні комплекси вітчизняного виробництва DX-NT, Tredex, NeuroSoft, які є стаціонарними, виділення ЗВП виконують на основі усереднення постстимульних реалізацій, для прийняття рішення порівнюють амплітудно-часові характеристики екстремумів оцінки ЗВП з нормативними значеннями (Dawson G., Davila C., Гніздецький В., Ліванов М.). При цьому не враховується властивість циклічності спонтанної ЕЕГ під час стимуляції та стохастична залежність сигналів у різних каналах реєстрації, породжена фізіологічною будовою зорової системи, діагностичні рішення приймаються без урахування значущості різних комплексів інформативних характеристик.

Закордонні ІТ та програмні комплекси NeuroScan, OpenBCI, Brain Products, Biosemi, NeuroSky, Emotiv Epos, iMotions є хмарними рішеннями, функціонал яких надається згідно підписок та обраних функціональних модулів, при цьому вони орієнтовані здебільшого на задачі нейро-комп'ютерного інтерфейсу, а не офтальмологічні потреби. Діагностика в даному випадку відбувається шляхом порівняння емпірично отриманих нормативних значень із оціненими діагностичними параметрами: амплітудно-частотними характеристиками компонент ІСА (Independent Component Analysis) чи РСА (Principal Component Analysis), множиною коефіцієнтів вейвлет-перетворення (Rosso O., Capilla A., Makeig S., Blanco S.) які не мають біофізичного обґрунтування, що ускладнює інтерпретацію отриманих результатів.

Отже, актуальність проведення дисертаційного дослідження обумовлена необхідністю розроблення теоретичних та прикладних засад побудови та впровадження інтелектуальної інформаційної технології аналізу усталених ЗВП, в якій будуть реалізовані методи прийняття діагностичних рішень на основі статистичного підходу та ідентифікації інформативних параметрів із врахуванням періодичності ймовірнісних характеристик досліджуваних сигналів, їх взаємозв'язку у різних каналах реєстрації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з основними напрямками науково-дослідних робіт Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя, зокрема: «Удосконалення радіотехнічного методу виявлення. Модернізація виробу К-120-Р» (номер державної реєстрації 0118U001483), де автор була виконавцем; вклад автора полягає у розробці спеціального програмного забезпечення для опрацювання даних з метою виявлення, оцінки типу (класифікації) та автоматичної обробки корисних сигналів.

Експериментальні дослідження здійснено у рамках «Угоди про співпрацю у проведенні наукових досліджень з подальшим впровадженням отриманих результатів у практику» між ТНТУ та Інститутом медико-біологічних проблем Тернопільського національного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності процесу офтальмодіагностики на основі опрацювання усталених ЗВП шляхом створення ІТ із використанням нової математичної моделі, методів ідентифікації та статистичного оцінювання діагностичних параметрів і прийняття рішень із врахуванням циклічності досліджуваних сигналів та їх взаємозв'язку у різних каналах реєстрації.

Для досягнення вказаної мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати наявне математичне та алгоритмічне забезпечення інформаційних технологій статистичного аналізу електричної активності та ВП, відповідні протоколи діагностики в офтальмології, дослідити область їхнього застосування і визначити труднощі та обмеження при розв'язанні задач офтальмодіагностики за двоканальним усталеним ЗВП.

2. Обґрунтувати математичну модель усталених ЗВП, яка би відображала біофізичний механізм їхнього породження, враховувала взаємозв'язок та періодичні характеристики сигналів, що реєструються одночасно від різних півкуль кори головного мозку, дозволяла здійснювати ймовірнісний та статистичний аналіз ЗВП. На основі математичної моделі обґрунтувати та окреслити множину інформативних ознак придатних для використання в ІТ.

3. Розробити алгоритми ідентифікації діагностичних параметрів на основі попередньо обґрунтованої множини інформативних ознак.

4. Запропонувати метод прийняття рішень на основі ідентифікованих діагностичних параметрів.

5. Реалізувати інформаційну технологію аналізу усталеного ЗВП на основі запропонованої моделі, методів та програмних інструментів у вигляді хмарного програмного забезпечення, яке повинне забезпечувати оцінювання ймовірнісних характеристик, ідентифікацію інформативних ознак, побудову діагностичного простору та прийняття діагностичного рішення.

Об'єкт дослідження – процес здійснення офтальмодіагностики на основі аналізу усталених ЗВП.

Предмет дослідження – модель, методи статистичного опрацювання та прийняття діагностичних рішень із використанням усталених ЗВП.

Методи дослідження. З метою розв'язання вказаних задач використано методи теорії випадкових процесів для обґрунтування математичної моделі двоканального усталеного ЗВП, методи лінійної алгебри та теорію функцій дискретного аргументу

для ідентифікації інформативних параметрів сигналу, чисельних методів та алгоритмів навчання з вчителем для прийняття рішення про стан зорового аналізатора, теорії алгоритмів та програмування для побудови інформаційної технології.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблено математичну модель двоканального усталеного ВП у вигляді двовимірного лінійного періодичного випадкового процесу. Ця модель, на відміну від наявних враховує біофізичну природу формування електричної активності мозку, взаємозв'язок ЗВП, що реєструються одночасно від різних півкуль головного мозку та їх стохастично періодичний характер, що дозволяє здійснити ймовірнісний аналіз досліджуваних сигналів та запропонувати методи їх статистичного опрацювання.

2. Вперше запропоновано використання двовимірного розкладу Карунена-Лоева для ідентифікації діагностичних параметрів за усталеними ЗВП, що на відміну від існуючих одновимірних ознак враховує взаємозв'язок між обома каналами реєстрації. Це дозволило обґрунтувати можливість використання визначеної кількості власних векторів розкладу в інформаційній технології офтальмодіагностики, відповідно до частоти стимуляції.

3. Набув подальшого розвитку метод ортогональних розкладів для ідентифікації інформативних параметрів за математичним сподіванням усталених ЗВП, який на відміну від існуючого враховує стохастичну періодичність досліджуваного сигналу. Це дозволило обґрунтувати вибір коефіцієнтів розкладу математичного сподівання сигналу за базисом ортогональних поліномів Чебишева дискретного аргументу як діагностичних параметрів.

4. Набув подальшого розвитку метод бінарної класифікації усталених ЗВП на основі модифікованого алгоритму k – найближчих сусідів (KNN), який на відміну від наявних враховує діагностичну значимість різних комплексів запропонованих інформативних ознак, що дозволяє підвищити точність прийняття рішення в задачах офтальмодіагностики.

Практичне значення отриманих результатів. Одержані результати уможливили оцінювання діагностичних параметрів двоканального усталеного ЗВП з врахуванням стохастичної періодичності процесу та взаємозв'язку між каналами реєстрації, що дозволило реалізувати інформаційну технологію аналізу викликаних потенціалів мозку спричинених різними джерелами стимуляції в лабораторних наукових дослідженнях фізіологічного напрямку та у медичних закладах як один із інструментів у задачах діагностики. Окремі компоненти розробленої ІТ (ідентифікація та оцінювання інформативних параметрів, класифікація) можуть бути використані також в задачах опрацювання циклічних сигналів та завад.

Результати дисертаційної роботи впроваджено і використовуються у Комунальному підприємстві “Тернопільський міський лікувально-діагностичний центр” Тернопільської міської ради; в ТОВ “Тернопільське КБ радіозв'язку “Стріла”; в навчальному процесі кафедри медичної інформатики ТДМУ ім. І. Я. Горбачевського та кафедри кібербезпеки ТНТУ ім. І. Пулюя при вивченні дисциплін “Інтелектуальний аналіз даних” та “Обробка сигналів та зображень”.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом самостійних наукових досліджень, в яких вкладено авторський підхід до побудови інформаційної технології аналізу усталених ЗВП в задачах офтальмодіагностики. Наукові положення та основні результати, які містяться в дисертації, отримані здобувачем самостійно у процесі науково-дослідницької роботи. В роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать: [1, 8] – обґрунтування математичної моделі ЗВП у вигляді лінійного випадкового процесу; [2] – обґрунтування періодичних властивостей усталеного ЗВП та оцінювання інформативних характеристик досліджуваного сигналу з врахуванням періодичності; [3] – моделювання двоканального усталеного ЗВП у вигляді двовимірного лінійного періодичного випадкового процесу для задачі розробки ІТ аналізу ЗВП; [5] – ідентифікація інформативних параметрів усталеного ЗВП з використанням перетворення Карунена-Лоева для ІТ офтальмодіагностики; [6] – аналітичний огляд моделей, методів та ІТ аналізу електроенцефалограм і ЗВП.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи опубліковано та обговорювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, зокрема на: XV науковій конференції ТНТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 2011 р.); науковій конференції “Природничі науки та інформаційні технології” Тернопільського національного політехнічного інституту (м. Тернопіль, 2012 р.); VI Міжнародній академічній конференції молодих вчених “Computer Science and Engineering”, CSE-2013 (м. Львів, 2013 р.); III науково-технічній конференції “Інформаційні моделі, системи та технології” ТНТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 2013 р.); IV науково-технічній конференції “Інформаційні моделі, системи та технології” ТНТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 2014 р.); XIII Міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії”, TCSET’2016 (м. Львів – Славськ, 2016 р.); VII міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації” (м. Кам’янець-Подільський, 2016 р.); IV міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій” (м. Тернопіль, 2019 р.). Матеріали дисертації обговорювались на наукових семінарах кафедр комп’ютерних наук та кібербезпеки Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя, науково тематичному семінарі № 9 “Інформаційні системи, обчислювальна техніка та автоматизація” ТНТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 27 червня 2019 р.).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 13 наукових праць, в тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України (одноосібних статей – 1) та 8 тез доповідей у працях міжнародних та всеукраїнських наукових та науково-технічних конференцій. Публікації входять до наступних наукометричних баз даних з міжнародним індексом цитування: Scopus – 2 (з них 1 у періодичному виданні кuartилію Q3), 2 – Index Copernicus, 1- DOAJ, 2 – EBSCO, 1 – Polish Scholarly Bibliograp, 1 – Norwegian Social Science Data Services.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 117 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 198 сторінок, з яких 147 сторінок основного тексту, 9 додатків на 22 сторінках, та містить 48 рисунків, 108 формул, 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено загальну характеристику дисертації, окреслено наукову новизну отриманих результатів, їхнє практичне значення, а також розкрито питання апробації результатів дисертації та їх висвітлення в наукових працях.

У **першому розділі** розглянуто проблематику теоретичних та методологічних основ створення та застосування ІТ аналізу усталених ЗВП, що потребують вирішення при розробці будь-якої ІТ, а саме: побудова адекватної математичної моделі досліджуваного сигналу, ідентифікація діагностичних параметрів, розробка критеріїв та правил прийняття рішень, огляд сучасних інструментальних засобів для створення програмного забезпечення. Консолідовані результати порівняльного аналізу представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика існуючих ІТ аналізу ЕЕГ та ВП

ІТ \ Харак-ки	Open BCI	Emotiv (open API)*	NeuroScan	Tredex, Dx-system, Axon	iMotion (SAAS)**
Наявність модуля реєстрації	+	+	+	+	-
Технологія передачі даних	Wi-Fi, Bluetooth, кабель			кабель	зчитування файлів
Математична модель	детермінована функція (корисний сигнал, ЗВП) + випадковий процес (ЕЕГ), детермінована періодична функція (корисний сигнал, усталений ЗВП) + стаціонарний випадковий процес (ЕЕГ)				
Діагностичні параметри	амплітудно-часові характеристики, коефіцієнти розкладу в ряд Фур'є, коефіцієнт кореляції між каналами реєстрації				
	амплітуди та частоти компонент ІСА, РСА	множина коефіцієнтів вейвлет-перетворення	множина коефіцієнтів вейвлет-перетворення, коефіцієнти сингулярного розкладу	множина коефіцієнтів вейвлет-перетворення	амплітуди та частоти компонент ІСА, РСА
Критерії та правила прийняття рішень	порівняння діагностичних ознак відповідно до нормативів, візуальний аналіз				
*API – Application Programming Interface, ** SAAS - Software as a Service					

Дані табл.1 свідчать, що більшість відомих ІТ для опрацювання ВП використовують математичну модель, яка є сумою детермінованої функції та стаціонарного випадкового процесу. Оскільки, рівень корисного сигналу (1.5 – 7 мкВ) значно нижчий ніж рівень фонові ЕЕГ (~ 50 мкВ), то візуально оцінити ЗВП є неможливо (рис.1). В рамках адитивної моделі такі ІТ використовують усереднення

на множині постстимульних реалізацій сигналу для виділення корисної складової і лише її розглядають як джерело інформативних параметрів, не враховуючи ЕЕГ та взаємозв'язок між каналами реєстрації, змішування імпульсів у зоровому перехресті.

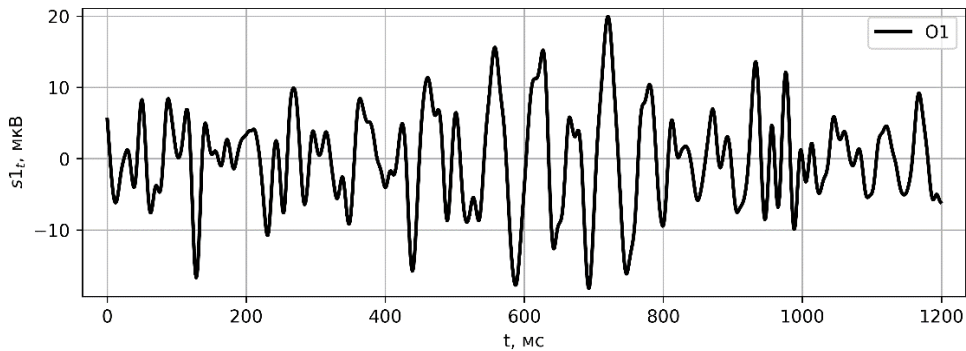


Рисунок 1 – Реалізація усталеного ЗВП (частота світлової стимуляції $F_s=10$ Гц)

Хмарні рішення для реалізації програмного забезпечення, бездротова передача даних, отримання результатів діагностики у мобільних додатках відображають наявні тенденції щодо архітектури ІТ та задають вимоги ринку щодо розробки та використання відповідних програмних засобів, які було враховано у роботі.

На основі проведеного порівняльного аналізу здійснено постановку завдань дисертаційних досліджень.

Другий розділ присвячений математичному моделюванню усталеного ЗВП для отримання адекватної моделі з метою її застосування у розробці ІТ. В роботі було сформовано вимоги до нової математичної моделі ЗВП, яка повинна: відобразити біофізичний процес генерування електричної активності мозку, враховувати стохастичний характер ВП та періодичні властивості усталеного ЗВП, взаємовплив між каналами реєстрації, мати можливість визначення діагностичних параметрів для застосування в офтальмодіагностиці.

Математичну модель побудовано на основі аналізу біофізичних особливостей генерації електричної активності кори головного мозку, відповідно до якої сигнали, які можна зареєструвати з поверхні скальпа, є результатом сумарної дії великої кількості збуджуючих та гальмівних постсинаптичних потенціалів (ЗПСП та ГПСП), що генеруються синапсами у випадкові моменти часу (як результат впливу потенціалів дії – ПД).

Введемо випадкову функцію $V_n(\tau_n, t)$, що характеризує окремий імпульс, як зміну потенціалу окремого нейрона, де τ_n – випадковий момент часу активації n -ого нейрона та початок генерування імпульсу, t – момент спостереження.

З метою конкретизації функції $V_n(\tau_n, t)$ представимо її як:

$$V_n(\tau_n, t) = \alpha_n \varphi(\tau_n, t), \quad (1)$$

де $\alpha_n, n \in \mathbf{Z}$ – послідовність незалежних випадкових величин із функцією розподілу $F_\alpha(x; \tau)$, $x \in \mathbf{R}$, що описують амплітуду окремих імпульсів;

$\varphi(\tau_n, t)$ – не випадкова функція, що представлена згідно з моделлю Ходжкіна-Хакслі:

$$\varphi(\tau, t) = e^{-\beta(\tau)(t-\tau)} \sin(\omega(\tau)(t-\tau)U(t-\tau)), \quad (2)$$

де $U(s) = \begin{cases} 1, & s \geq 0 \\ 0, & s < 0 \end{cases}$ – функція Хевісайда; $\beta(\tau) > 0, \omega(\tau) > 0$ – параметри імпульсу, що виникають у моменти часу τ .

Оскільки, зареєстрований сигнал є сумарною реакцією на зміну потенціалів усіх активних нейронів, то результуючий ЗВП представимо у формі випадкового процесу:

$$\xi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n(\tau_n, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_n e^{-\beta(\tau_n)(t-\tau_n)} \sin(\omega(\tau_n)(t-\tau_n)) U(t-\tau_n), t \in (-\infty, \infty). \quad (3)$$

На основі представленого у роботі детального аналізу процесу, що характеризує моменти виникнення імпульсів у мозку людини, було отримано наступне: послідовність моментів часу виникнення імпульсів $\tau_n, n \in \mathbf{Z}$ є неоднорідним пуассонівським потоком із параметром $\lambda(\tau)$, що характеризує інтенсивність появи імпульсів і залежить від часу їхнього виникнення. Ввівши $\pi(\tau), \tau \in (-\infty, \infty), \mathbf{P}\{\pi(0)=0\}=1$ – узагальнений неоднорідний пуассонівський процес, що відповідає нестационарному пуассонівському потокові із параметром $\lambda(\tau)$ таким чином, щоб його стрибки виникали у моменти часу $\tau_n, n \in \mathbf{Z}$ появи імпульсів і дорівнювали випадковим величинам $\alpha_n, n \in \mathbf{Z}$, процес (3) представимо у вигляді стохастичного інтегралу:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\beta(\tau)(t-\tau)} \sin(\omega(\tau)(t-\tau)) U(t-\tau) d\pi_1(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\pi(\tau). \quad (4)$$

Випадковий процес (4) є лінійним випадковим процесом (ЛВП) із ядром $\varphi(\tau, t)$, що характеризує форму зміни електричного потенціалу одного нейрона (імпульсу), і породжуючим процесом $\pi(\tau)$.

Після збудження зорового аналізатора виникають спочатку імпульси із високою частотою і швидкою тенденцією до зменшення амплітуди, згодом вторинні імпульси із меншою частотою і нижчим коефіцієнтом затухання (рис. 2).

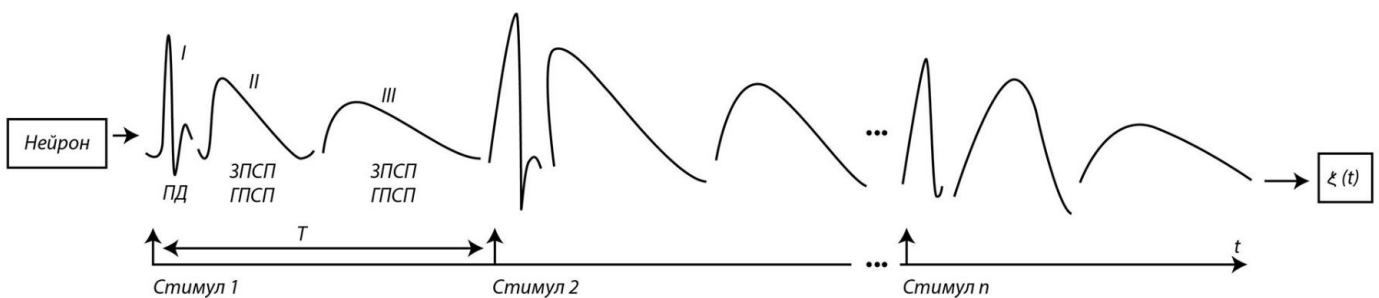


Рисунок 2 – Схематичне зображення механізму генерації усталеного ЗВП

Така тенденція до генерування імпульсів повторюється циклічно відповідно до частоти фотостимуляції. Тому, не випадкові функції, що характеризують частоту та коефіцієнт затухання імпульсу будуть також T -періодичними: $\omega(\tau) = \omega(\tau + T), \beta(\tau) = \beta(\tau + T)$, що було враховано при доведенні періодичності ядра процесу (4). Оскільки частота генерації імпульсів спричинених певним джерелом відповідає його зовнішній частоті стимуляції, то будемо вважати, що інтенсивність

появи імпульсів є періодичною $\lambda(\tau) = \lambda(\tau + T)$. Тобто, для узагальненого пуассонівського процесу $\pi(\tau)$ його прирости є стохастично періодичними з періодом $T > 0$ (де T – період фотостимуляції).

На основі теореми про періодичність ЛВП, сформульованої Б.Г. Марченком, та аналізу особливостей генерування усталеного ЗВП в роботі було доведено, що процес $\xi(t)$ є лінійним періодичним (за Слуцьким Є. Є.) випадковим процесом (ЛПВП).

Далі було конкретизовано математичну модель з врахуванням двоканальності досліджуваного ЗВП. Позначимо випадковий процес, який реєструється за допомогою першого електрода (позиція O_1) як $\xi_1(t)$, і відповідно другого (позиція O_2) як $\xi_2(t)$ (схематично на рис. 3), двоканальний ЗВП тоді можна представити у вигляді двовимірного випадкового процесу:

$$\Xi(t) = \begin{pmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{де } \xi_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{11}(\tau, t) d\pi_1(\tau) + \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{21}(\tau, t) d\pi_2(\tau) = \sum_{m=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{m1}(\tau, t) d\pi_m(\tau);$$

$$\xi_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{12}(\tau, t) d\pi_1(\tau) + \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{22}(\tau, t) d\pi_2(\tau) = \sum_{m=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{m2}(\tau, t) d\pi_m(\tau) \text{ (детальне пояснення формул для } \xi_1(t) \text{ та } \xi_2(t) \text{ наведено у дисертаційній роботі).}$$

Введемо вектор породжуючих процесів $\Pi(\tau) = \begin{pmatrix} \pi_1(\tau) \\ \pi_2(\tau) \end{pmatrix}$ та матрицю ядер ЛВП

$$\text{двовимірної моделі } \Phi(\tau, t) = \begin{pmatrix} \varphi_{11}(\tau, t) & \varphi_{12}(\tau, t) \\ \varphi_{21}(\tau, t) & \varphi_{22}(\tau, t) \end{pmatrix}, \text{ тоді процес (5) представимо у}$$

наступному вигляді:

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

Стохастична періодичність процесу $\Xi(t)$ (6) є наслідком доведеної стохастичної періодичності одновимірного процесу (4). Справедливо стверджувати, що процес (6) є двовимірним ЛПВП за Слуцьким Є. Є. і будь-яка m - вимірна характеристична функція такого процесу є T -періодичною за сукупністю своїх часових аргументів. У роботі обґрунтовано періодичність математичного сподівання та кореляційної функції процесу (6), а саме справедливими є такі співвідношення:

$$\mathbf{M}\Xi(t) = \mathbf{M}\Xi(t + T), \quad (7)$$

$$R_{mn}(t_1, t_2) = R_{mn}(t_1 + T, t_2 + T), m, n = \overline{1, 2}.$$

Таким чином, побудована математична модель усталеного ЗВП у вигляді двовимірного ЛПВП враховує вищезгадані вимоги та є придатною для використання в ІТ аналізу усталених ЗВП.

У **третьому** розділі наведено алгоритми для реалізації основних функцій ІТ, а саме: аналізу досліджуваного сигналу, оцінювання діагностичних параметрів та прийняття рішень щодо стану зорової системи людини.

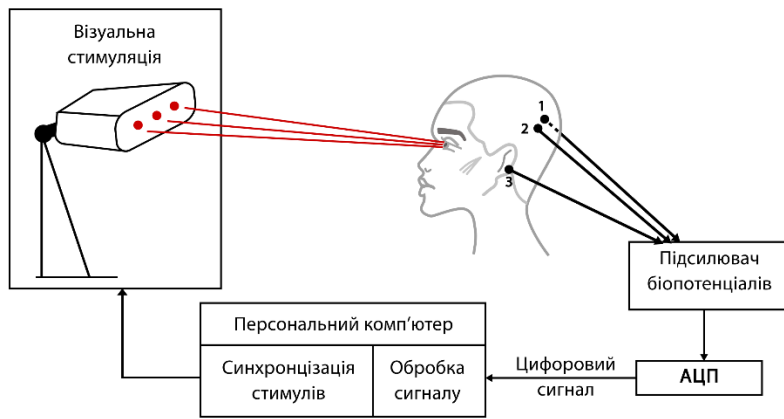


Рисунок 3 – Схематичне зображення виміральної системи для реєстрації ЗВП (1, 2 – позиції розміщення електродів O_1 та O_2 , 3 – референтного електроду F_z)

елементів, розмірністю 15360 відліків.

Нехай $\xi_{1,i}$ та $\xi_{2,i}$, $i \in \mathbf{Z}$ – випадкові сигнали з дискретним часом, що одночасно реєструються з позицій O_1 та O_2 і, згідно обраної моделі, є стохастично періодичними з періодом $N = \frac{T}{\Delta t}$ (кількість відліків на періоді T), Δt – крок дискретизації.

Для отримання множини інформативних характеристик, які би оптимально відображали усталений ЗВП, було виконано аналіз досліджуваного сигналу, що складається із наступних кроків (рис. 4):

1. Оцінювання періоду кожного з одноканальних усталених ЗВП отриманих при реєстрації на позиціях O_1 та O_2 з використанням методу φ – серій (послідовностей відліків процесу взятих через період N), запропонованого М. В. Приймаком.

2. Проведено гістограмний аналіз та перевірку нормальності φ – серій ЗВП з використанням критерію Д'Агостіно. Отримані статистичні результати засвідчують наявність гауссівського розподілу сигналу. Для підтвердження стаціонарності φ – серій використано t_v – критерій Стюдента та F – критерій Фішера. На рис.5 наведено приклад гістограми та оцінки щільності розподілу за припущення нормальності для однієї з φ – серій ЗВП.

3. У дисертації показано, що математичне сподівання та кореляційна функція двоканального ЗВП:

- залежать від характеристик обґрунтованої математичної моделі у вигляді ЛПВП (ядра та породжуючого процесу);
- повністю визначають ймовірнісний розподіл досліджуваного сигналу, враховуючи його гауссовість;
- можуть бути оцінені за результатами експерименту методом φ – серій.

Для отримання вхідних даних зареєстровано усталені ЗВП згідно стандартів для реєстрації клінічних ЗВП (рис. 3) при наступних частотах стимуляції червоним світлом (світлодіодні лампи): 6, 8, 10 та 12 Гц. Участь у дослідженні взяли 45 людей віком від 18-41 року, 15 з них з патологіями зорової системи. Для реєстрації використовувався програмний комплекс DX-NT-32 (м.Харків) з частотою дискретизації $F_{sample} = 512$ Гц. Генеральна сукупність складається із 225

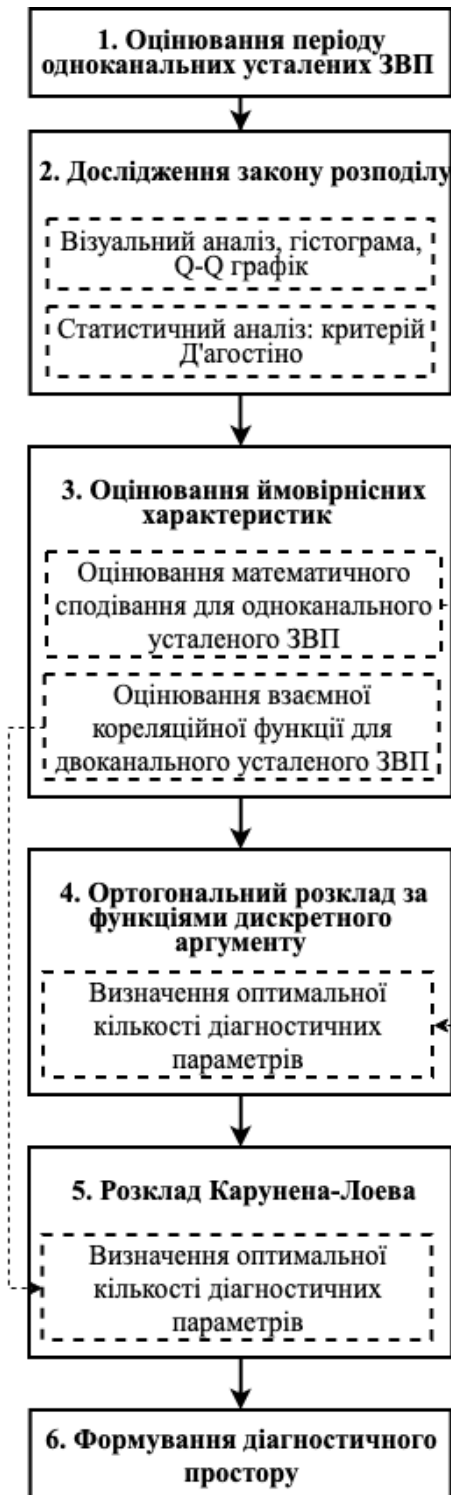


Рисунок 4 – Схематичне зображення алгоритму оцінювання діагностичних параметрів

усталеного ЗВП здійснено з використанням двовимірного розкладу Карунена-Лоева сигналу з врахуванням його стохастичної періодичності.

Позначимо $X_i = \xi_{1,i} - \mathbf{M}\xi_{1,i}$, $Y_i = \xi_{2,i} - \mathbf{M}\xi_{2,i}$. Введемо вектор, зображений у наступному вигляді:

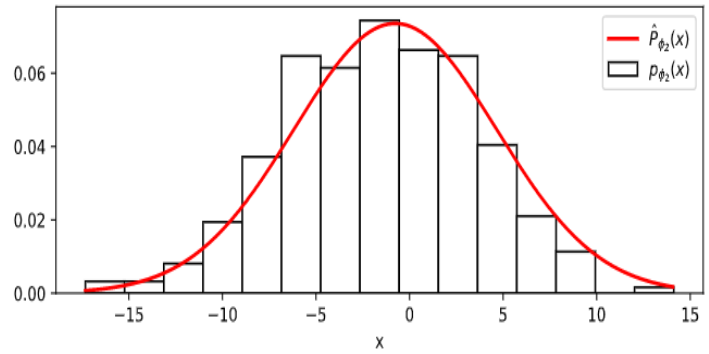


Рисунок 5 – Реалізації гістограми та оцінки щільності розподілу для ϕ_2 -серії усталеного ЗВП при частоті фотостимуляції $F_s = 10$ Гц

Тому математичне сподівання та кореляційну функцію використано для ідентифікації інформативних характеристик.

4. Ідентифікація діагностичних параметрів на основі математичного сподівання усталеного ЗВП з використанням методу ортогональних розкладів за базисами поліномів Чебишева, Кравчука, Лагера дискретного аргументу, а також дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Конкретний ортогональний базис для ідентифікації діагностичних параметрів було вибрано шляхом аналізу енергетичного вкладу $e(r)$ перших складових розкладу у повну енергію математичного сподівання ЗВП на одному періоді, а саме:

$$e(r) = \frac{\sum_{k=0}^{r-1} a_k^2}{\sum_{i=0}^{N-1} m_i^2}, \quad (8)$$

де a_k – коефіцієнти ортогонального розкладу за одним із базисів, r – кількість коефіцієнтів, $\sum_{i=0}^{N-1} m_i^2$ – повна енергія середнього досліджуваної послідовності.

5. Ідентифікацію діагностичних параметрів на основі кореляційної функції двоканального

$$Z_i = \begin{cases} X_i, & 0 \leq i \leq N-1 \\ Y_{i-N}, & N \leq i \leq 2N-1 \end{cases} \quad (9)$$

Кореляційна матриця вектору (9) має вигляд:

$$R_{i,j}^Z = \begin{cases} \mathbf{M}(X_i X_j), & 0 \leq i, j < N-1 \\ \mathbf{M}(X_i Y_{j-N}), & 0 \leq i < N-1 \leq j < 2N-1 \\ \mathbf{M}(X_j Y_{i-N}), & 0 \leq j < N-1 \leq i < 2N-1 \\ \mathbf{M}(Y_{i-N} Y_{j-N}), & N-1 \leq i, j < 2N-1 \end{cases} \quad (10)$$

Компоненти матриці (10) характеризують кореляційні функції послідовностей X_i та Y_i , а також взаємну кореляційну функцію (характеризує взаємозв'язок усталених ЗВП між каналами) цих послідовностей в межах одного циклу $i \in \overline{0, N-1}$.

Розклад Карунена-Лоева вектору (9) має вигляд:

$$Z_i = \sum_{k=0}^{N-1} \phi_{k,i} \eta_k, \quad i \in \overline{0, N-1}, \quad (11)$$

де $\phi_{k,i}$ – власні вектори матриці (10), що утворюють ортонормований базис в R^N ; $\eta_k, k \in \overline{0, N-1}$ – незалежні випадкові величини із $\mathbf{M}\eta_k = 0$ та $\mathbf{D}\eta_k = \lambda_k$, де λ_k – власні числа кореляційної матриці (10). У дисертації наведено спосіб оцінювання матриці (10) із використанням методу φ – серій та урахуванням стохастичної періодичності досліджуваного сигналу.

Повна енергія вектору (9) дорівнює $\sum_{k=0}^{N-1} \lambda_k$, а енергетичний вклад перших компонент розкладу (11) визначаємо як:

$$e(m) = \frac{\sum_{k=0}^{m-1} \lambda_k}{\sum_{k=0}^{N-1} \lambda_k}, \quad m \leq N. \quad (12)$$

Тому на основі емпірично отриманих результатів (розділ 4) вирішено використовувати як діагностичні параметри перші m власних векторів $\{\phi_{0,i}, \phi_{1,i}, \dots, \phi_{m-1,i}\}$, для яких $e(m) \geq 0.95$.

Розробивши методику ідентифікації діагностичних параметрів, наступним етапом при розробці ІТ аналізу усталених ЗВП є імплементація алгоритму прийняття рішення, який би дозволив виконати бінарну класифікацію. З метою обрання оптимального набору параметрів класифікатора виконано навчання класифікатора на основі попередньо зареєстрованих і промаркованих даних, що складається з наступних кроків (рис.б):

1. Маркування тестових даних відбувалось на основі поставленого діагнозу після офтальмологічного огляду відповідно до двох наперед визначених класів “Здоровий” чи “Патологія”.

2. Побудова набору діагностичних параметрів для кожного промаркованого елементу тестових даних з використанням вищеописаного алгоритму (рис.4). В

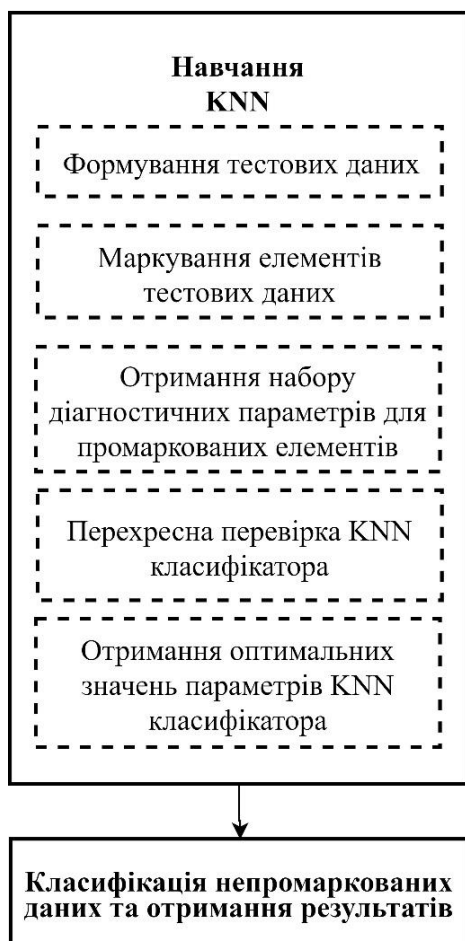


Рисунок 6 – Схематичне зображення алгоритму класифікації

результаті кожному елементу тестових даних відповідає точка в багатовимірному діагностичному просторі:

$$\Psi = (A_1, A_2, \Theta), \quad (13)$$

де $A_1 = (a_{1,0}, a_{1,1}, \dots, a_{1,r-1})$ та $A_2 = (a_{2,0}, a_{2,1}, \dots, a_{2,r-1})$ – вектори, елементами яких є коефіцієнти ортогонального розкладу математичного сподівання одноканального усталеного ЗВП зареєстрованого з позиції O_1 та O_2 відповідно; Θ – матриця власних векторів розмірності $(m \times N)$ кореляційної матриці $R_{i,j}^Z$ (10).

3. Знаходження оптимальних параметрів класифікатора, що включають значення кількості найближчих сусідів k та вагових коефіцієнтів, які відображають ступінь важливості ознак, для ініціалізації алгоритму KNN.

У роботі було модифіковано наявний KNN алгоритм бінарної класифікації, а саме метрику, за якою і визначається належність до одного з класів, та додано вагові коефіцієнти, що відображають важливість ознак із діагностичного простору Ψ (13).

Нехай маємо набори інформативних характеристик для двох двоканальних усталених ЗВП задані як $\Psi_1 = (A_{11}, A_{21}, \Theta_1)$ та $\Psi_2 = (A_{21}, A_{22}, \Theta_2)$

відповідно. Метрику для реалізації алгоритму KNN представимо у наступному вигляді:

$$d = \alpha_1(1 - S_{KLT}) + \alpha_2 S_M^1 + \alpha_3 S_M^2, \quad (14)$$

де $S_{KLT} = \frac{tr(\Theta_1^T \Theta_2 \Theta_2^T \Theta_1)}{m}$ – фактор подібності між двома матрицями власних векторів

Θ_1 та Θ_2 ; $S_M^1 = \sqrt{(A_{11} - A_{21})(A_{11} - A_{21})^T}$ та $S_M^2 = \sqrt{(A_{21} - A_{22})(A_{21} - A_{22})^T}$ – евклідові відстані між відповідними векторами коефіцієнтів ортогонального розкладу математичного сподівання; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – вагові коефіцієнти, при цьому $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1$.

В результаті застосування перехресної перевірки емпірично отримано значення вагових коефіцієнтів $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ та параметра k , при яких досягаються найкращі показники якості класифікації згідно вимог точності, чутливості та специфічності, що наведено у роботі.

4. Класифікація непромаркованого зареєстрованого двоканального усталеного ЗВП з використанням KNN із експериментально оціненими його параметрами.

У четвертому розділі відображено основні етапи реалізації ІТ аналізу усталених ЗВП в задачах офтальмодіагностики на основі властивостей математичної моделі та алгоритмів оцінювання діагностичних параметрів та класифікації.

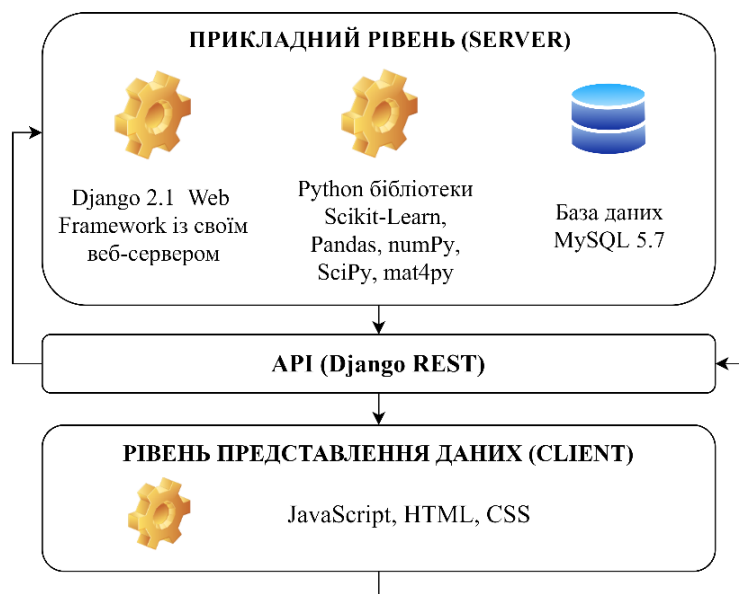


Рисунок 7 – Клієнт-серверна архітектура ІТ аналізу усталених ЗВП

У роботі наведено технічне завдання з врахуванням дисертаційної задачі, тенденцій, сучасних стандартів розробки, нормативних документів до створення ІТ. Проаналізувавши вимоги щодо ІТ було використано клієнт-серверну архітектуру та відповідні програмні інструменти для реалізації прикладного рівня, API інтерфейсу та рівня представлення результатів (рис.7).

З метою візуалізації загальної структури ІТ аналізу усталених ЗВП представлено діаграму компонент (рис.8), яка відображає взаємозв'язки між функціональними модулями програмного забезпечення, а саме:

модулі завантаження даних для аналізу, оцінювання періоду та ймовірнісних характеристик двоканального усталеного ЗВП, ідентифікації діагностичних параметрів з використанням ортогональних розкладів, класифікації та виводу результатів.

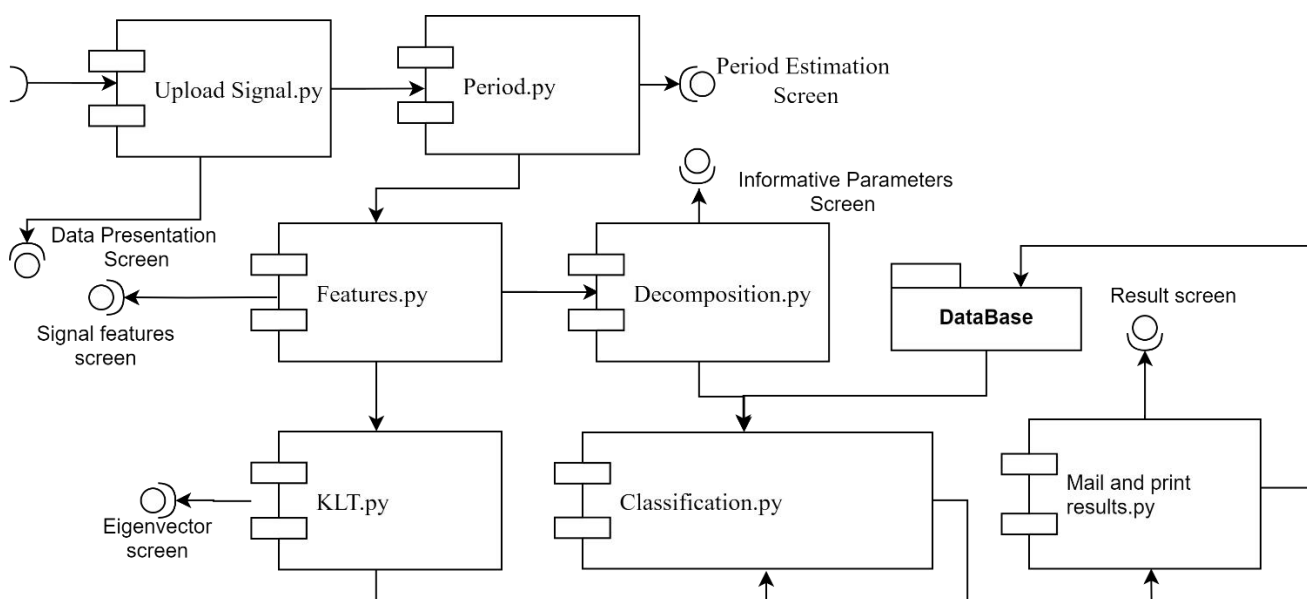


Рисунок 8 – Діаграма компонентів ІТ аналізу двоканального усталеного ЗВП

У дисертації представлено результати роботи кожного з модулів на прикладі двоканального усталеного ЗВП при $F_s = 10$ Гц. Зокрема, ввівши діапазон “пробних

періодів” $[40, 60]$, що відповідають часовому інтервалу $[0.078, 0.117]$ в секундах, було оцінено період усталеного ЗВП $\hat{T} \approx 0,1$ с, який співпадає з частотою фотостимуляції. Такий результат є одним із аргументів, що підтверджує адекватність математичної моделі.

У результаті застосування модуля “Features.py” на основі імплементації методу φ – серій одержано статистичні оцінки математичного сподівання, середньоквадратичного відхилення на двох періодах (рис.9) для кожного із одноканальних усталених ЗВП та фонові EEG.

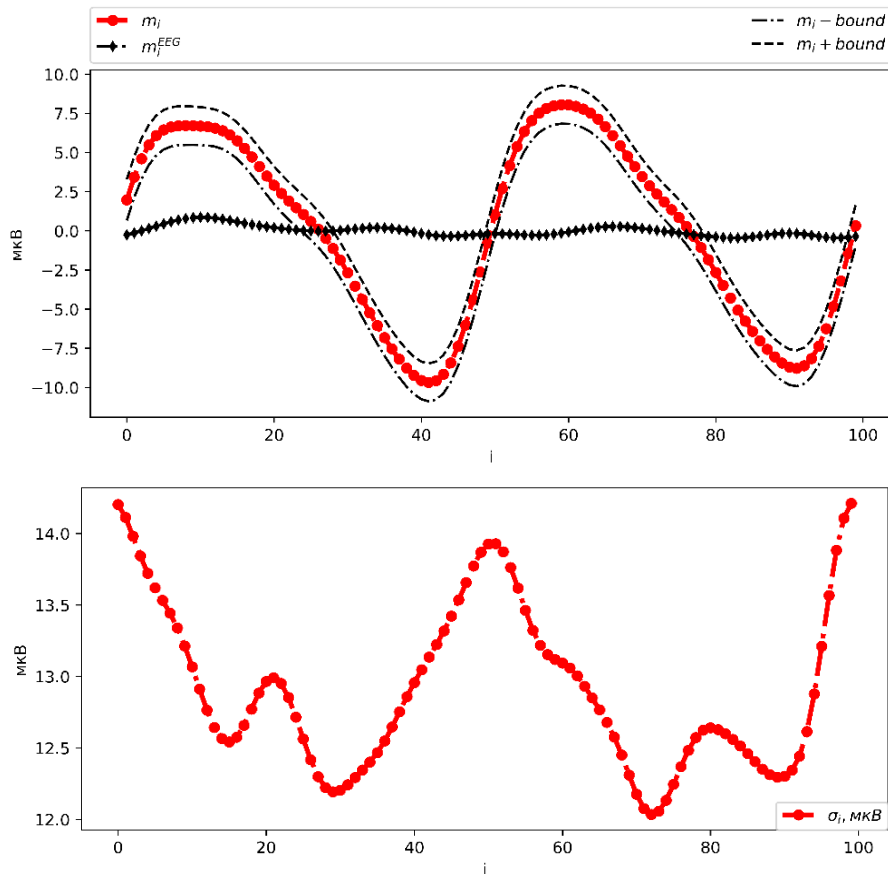


Рисунок 9 – Графіки оцінок математичного сподівання (точкова та інтервальна оцінки) та середньоквадратичного відхилення усталеного ЗВП (m_i та σ_i) при $F_s = 10$ Гц та сигналу зареєстрованого без стимуляції (m_i^{EEG})

Для ідентифікації інформативних параметрів на основі результатів ортогональних розкладів за базисами функцій Чебишева, Лагера, Кравчука дискретного аргументу та ДПФ було проаналізовано енергетичний вклад $e(r)$ (8) перших n складових розкладу у повну енергію математичного сподівання. Аналіз результатів свідчить про те, що найменша кількість складових розкладу, необхідних для відображення 95% ($e(r) = 0.95$) енергії математичного сподівання усталеного ЗВП при $F_s = 10$ Гц (рис.10), отримується при розкладі за базисом функцій Чебишева (лише 3 складових розкладу).

Також отримано кількість інформативних власних векторів кореляційної матриці $R_{i,j}^Z$ застосувавши двовимірний розклад Карунена-Лоева та критерій (12) за

умови, що $e(m) = 0.95$. В результаті використання програмних модулів Decomposition.py та KLT.py було знайдено мінімальні кількості складових розкладів, які інтерпретовано як діагностичні характеристики – вектори A_1, A_2 та матрицю Θ необхідні для ініціалізації класифікації з використанням KNN (таблиця 2).

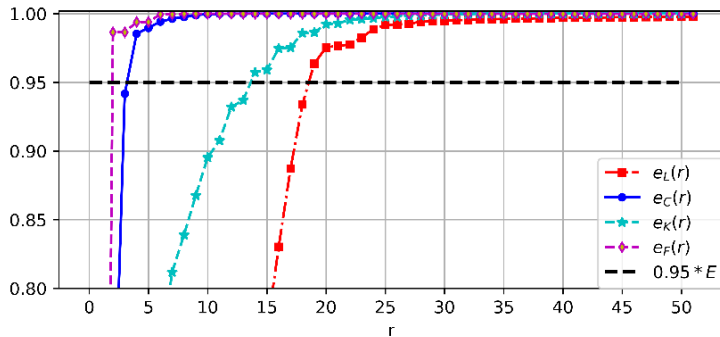


Рисунок 10 – Графік залежності енергетичного вкладу перших r складових ортогонального розкладу в повну енергію E математичного сподівання ($e_L(r)$) – при використанні системи базисних функцій Лагера, $e_C(r)$ – функцій Чебишева, $e_K(r)$ – функцій Кравчука, $e_F(r)$ – ДПФ)

З метою ініціалізації алгоритму класифікації KNN у роботі обчислено значення вагових коефіцієнтів – $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ метрики d (14) та кількості найближчих сусідів k застосувавши метод перехресної перевірки (GridSearchCV) для навчальної вибірки обсягом 35 елементів в тренувальному наборі даних та 10 в тестувальному. На основі отриманих результатів оцінено оптимальні значення параметрів класифікатора KNN для сигналів з різною частотою стимуляції (в таблиці 3 для усталеного ЗВП при $F_s = 10$ Гц).

Таблиця 2 – Оптимальна кількість інформативних параметрів двоканального усталеного ЗВП зареєстрованого при різних частотах стимуляції

Кількість елементів множини	Частота стимуляції при реєстрації усталеного ЗВП, Гц			
	6	8	10	12
$A_1, A_2 (r, r)$	5, 5	5, 5	3, 3	3, 3
$\Theta (m \times N)$	18×85	15×64	12×51	10×43

Таблиця 3 – Залежність характеристик класифікатора від параметрів методу KNN для усталеного ЗВП при $F_s = 10$ Гц (виділено оптимальний варіант)

Вагові коефіцієнти			k	Точність, %	Чутливість, %	Специфічність, %
α_1	α_2	α_3				
0	0,5	0,5	9	82,2	66,7	9,8
1/3	1/3	1/3	9	86,7	78,6	6,7
0,5	0,25	0,25	9	88,1	83,9	6,7
0,4	0,3	0,3	9	93,5	90,6	5,3
0,2	0,4	0,4	7	91,7	87,1	5,9
0,3	0,35	0,35	9	97,2	93,3	3,2

В ІТ реалізовано метод бінарної класифікації на класи “Здоровий” чи “Патологія” з використанням модифікованого методу найближчих сусідів (Classification.py) на основі набору інформативних параметрів Ψ та, емпірично

визначених методом перехресної перевірки, параметрів класифікатора в залежності від частоти стимуляції при реєстрації усталеного ЗВП. Результат класифікації відображається на моніторі у вигляді таблиці, що відображає відстань до k найближчих сусідів та ймовірність ототожнення з тим чи іншим класом.

Перспективи розвитку досліджень ІТ для аналізу двоканального усталеного ЗВП можна окреслити наступним чином: удосконалення методу класифікації з метою встановлення конкретних діагнозів. Для цього необхідно накопичувати промарковані зареєстровані сигнали ЗВП відповідно до кожного захворювання з метою подальшої діагностики.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання підвищення ефективності процесу офтальмодіагностики на основі опрацювання усталених ЗВП шляхом реалізації інформаційної технології із використанням нової математичної моделі, методів ідентифікації та статистичного оцінювання діагностичних характеристик і прийняття рішень із урахуванням циклічності досліджуваних сигналів та їх взаємозв'язку у різних каналах реєстрації. При цьому отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз методичного та алгоритмічного забезпечення наявних інформаційних технологій автоматизованого аналізу спонтанної електричної активності та викликаних потенціалів мозку, діючих протоколів діагностики в офтальмології, що дозволило обґрунтувати необхідність та актуальність створення інформаційної технології для офтальмодіагностики на основі нової математичної моделі двоканальних усталених ЗВП та з використанням відповідних їй інформативних ознак, здійснити постановку завдання дисертаційного дослідження.

2. Розроблено та обґрунтовано математичну модель двоканального усталеного ЗВП у вигляді двовимірного ЛПВП, яка відображає біофізичний механізм формування електричної активності мозку спричиненої зовнішньою стимуляцією, враховує взаємозв'язок між каналами реєстрації, та дозволяє здійснювати статистичний аналіз досліджуваного сигналу з врахуванням його стохастичної періодичності.

На основі побудованої математичної моделі здійснено ймовірнісний та статистичний аналіз двоканальних усталених ЗВП, що дозволило охарактеризувати взаємозв'язок характеристик моделі (ядра і породжуючого процесу ЛПВП) із моментними функціями (математичним сподіванням та кореляційною функцією) двовимірного сигналу, обґрунтувати методи їхнього оцінювання з врахуванням стохастичної періодичності та аргументувати можливість їхнього використання для ідентифікації діагностичних параметрів.

3. Здійснено аналіз математичного сподівання досліджуваного сигналу з використанням методу ортогональних розкладів за базисами поліномів Чебишева, Кравчука, Лагера дискретного аргументу, а також з використанням базису дискретних експоненціальних функцій, що дозволило ідентифікувати перший комплекс діагностичних параметрів у вигляді множини коефіцієнтів розкладу за ортонормованим базисом поліномів Чебишева дискретного аргументу.

На основі використання двовимірного розкладу Карунена-Лоева досліджуваного сигналу ідентифіковано другий комплекс діагностичних характеристик у вигляді множини власних векторів кореляційної функції двоканального усталеного ЗВП, оцінювання якої здійснено з урахуванням стохастичної періодичності сигналу.

Ідентифікація нових комплексів діагностичних характеристик дозволяє розширити діагностичні можливості процесу офтальмодіагностики з використанням розробленої ІТ.

4. Обґрунтовано використання методу найближчих сусідів (KNN) для бінарної класифікації з використанням спеціальної метрики, у якій діагностична значимість обох комплексів діагностичних параметрів відображена з використанням відповідних вагових коефіцієнтів, які обчислено емпірично з використанням методу перехресної перевірки. Це дозволило підвищити точність класифікації для попередньо промаркованих навчальних вибірок.

5. Розроблену інформаційну технологію реалізовано у вигляді хмарного програмного забезпечення, яке дозволяє здійснювати оцінювання ймовірнісних характеристик та інформативних параметрів двоканального усталеного ЗВП, будувати відповідні діагностичні простори та проводити бінарну класифікацію станів зорової системи пацієнтів, що розширило функціональність підтримки прийняття рішень процесу офтальмодіагностики.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Fryz M., Stadnyk M. Justification of mathematical model of the steady-state visual evoked potential in a form of the linear random process. *Electronics and control systems*. 2013. No. 1 (35). PP.100-107 (*Index Copernicus, Crossref, EBSCO*).

2. Фриз М. Є., Стадник М. А. Лінійний періодичний випадковий процес як математична модель усталеного зорового викликаного потенціалу. *Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. Нац. акад. наук України, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова*. 2014. №72. С. 36-43.

3. Фриз М. Є., Стадник М. А. Математична модель двоканального усталеного зорового викликаного потенціалу в задачах розробки інформаційних технологій офтальмодіагностики. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2014. №1(209). С. 126-133 (*Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography*).

4. Стадник М. А. Оцінювання інформативних параметрів усталених зорових викликаних потенціалів з використанням їх розкладів за базисами дискретних ортогональних поліномів. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць*. 2016. №13. С. 150-160. (*Norwegian Social Science Data Services*).

5. Fryz M., Stadnyk M., Sherbak L. The feature extraction and estimation of the steady-state visual evoked potential by the Karhunen-Loeve expansion. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. No.1(85). PP. 56-62. (*Scopus, EBSCO, DOAJ*).

6. Фриз М. Є., Стадник М. А. Математичні моделі та методи аналізу електроенцефалограм і зорових викликаних потенціалів. *Матеріали XV наукової*

конференції ТНТУ ім. І. Пулюя: зб. тез доповідей, 4-15 груд. 2011 р. Тернопіль: ТНТУ, 2011. С. 6.

7. Стадник М. А. Статистичний аналіз зорових викликаних потенціалів стійкого стану. *Природничі науки та інформаційні технології: зб. тез доповідей*, 5-6 груд. 2012 р. Тернопіль: ТНТУ, 2012. С. 63.

8. Fryz M., Stadnyk M. Mathematical Model of the Steady-State Visual Evoked Potential in a Form of Linear Random Periodical Process. *Proceeding of the 6th International Academic Conference of Young Scientist "Computer Science and Engineering 2013 (CSE-2013)"*, November 21-23, 2013. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. PP. 134-135.

9. Стадник М. А. Лінійний випадковий процес як математична модель зорового викликаного потенціалу. *Матеріали III науково-технічної конференції "Інформаційні моделі, системи та технології"*, 24 квіт. 2013 р. Тернопіль: ТНТУ, 2013. С. 16.

10. Стадник М. А. Врахування двоканальності усталеного зорового викликаного потенціалу при побудові математичної моделі інформаційної системи офтальмодіагностики. *Матеріали IV науково-технічної конференції "Інформаційні моделі, системи та технології"*, 15-15 трав. 2014 р. Тернопіль: ТНТУ, 2014. С. 14.

11. Stadnyk M. The informative Parameters Determination for a Visual System Diagnostics by Using the Steady State Visual Evoked Potentials. *Modern Problems of Radio, Engineering, Telecommunications, and Computer Science. Proceeding of the 13th International TCSET'2016*, February 23-26, 2016. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2016. PP. 800-809. (*Scopus*).

12. Стадник М. А. Оцінювання інформативних параметрів усталених зорових викликаних потенціалів з використанням методу ортогональних перетворень. *Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: тези доповідей VII міжнародної наукової конференції*, 21-22 квіт. 2016 р. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2016. С. 214-216.

13. Стадник М. А. Оцінка інформативних параметрів на основі аналізу усталених зорових викликаних потенціалів як одна з ключових функцій інформаційної технології офтальмодіагностики. *Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції "Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій"*, 20-21 квіт. 2019 р. Тернопіль: ТНТУ, 2019. С. 64-67.

АНОТАЦІЯ

Стадник М. А. Інформаційна технологія аналізу усталених зорових викликаних потенціалів в задачах офтальмодіагностики. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання – підвищення ефективності діагностики зорового аналізатора людини внаслідок реалізації ІТ аналізу усталених ЗВП. При цьому обґрунтовано застосування двовимірного ЛПВП

як математичної моделі двоканального усталеного ЗВП, що відображає біофізичний механізм формування викликаних потенціалів, враховує взаємозв'язок між каналами реєстрації електричної активності; проведено ідентифікацію діагностичних параметрів досліджуваного сигналу з використанням ортогонального розкладу за функціями дискретного аргументу Чебишева математичного сподівання усталеного ЗВП та двовимірного перетворення Карунена-Лоева; визначено оптимальну кількість діагностичних параметрів, які достатньо повно відображають досліджуваний процес; реалізовано модифікований метод KNN для вирішення задачі класифікації з метою прийняття рішення про стан зорового аналізатора людини.

На основі обґрунтованої математичної моделі та відповідних методів ідентифікації та класифікації реалізовано ІТ аналізу усталених ЗВП в задачах офтальмодіагностики.

Ключові слова: усталений зоровий викликаний потенціал, двовимірний лінійний періодичний випадковий процес, ортогональні поліноми Чебишева, перетворення Карунена-Лоева, KNN метод, інформаційна технологія.

АННОТАЦИЯ

Стадник М. А. Информационная технология анализа зрительных вызванных потенциалов устойчивого состояния в задачах офтальмодиагностики. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Информационные технологии. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2019.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача - повышение эффективности диагностики зрительного анализатора человека в результате реализации ИТ анализа ЗВП устойчивого состояния. При этом обосновано применение двумерного линейного периодического случайного процесса как математической модели двухканального ЗВП устойчивого состояния, отражающий биофизический механизм формирования вызванных потенциалов, учитывает взаимосвязь между каналами регистрации электрической активности; проведена идентификация диагностических параметров исследуемого сигнала с использованием ортогонального разложения по функциям дискретного аргумента Чебышева математического ожидания ЗВП устойчивого состояния и двумерного преобразования Карунена-Лоева; определено оптимальное количество диагностических параметров, которые достаточно полно отражают исследуемый процесс; реализовано модифицированный метод KNN для решения задачи классификации с целью принятия решения о состоянии зрительного анализатора человека.

На основе обоснованной математической модели и соответствующих методов идентификации и классификации реализовано ИТ анализа ЗВП устойчивого состояния в задачах офтальмодиагностики.

Ключевые слова: зрительный вызванный потенциал устойчивого состояния, двумерный линейный периодический случайный процесс, ортогональные полиномы

ABSTRACT

Stadnyk M. Information technology of the steady-state visual evoked potentials analysis in the ophthalmologic diagnostics tasks – Manuscript.

Thesis for the degree of Ph. D. in the specialty 05.13.06 – Information technologies (technical sciences). – Ternopil Ivan Pulyk National Technical University, Ternopil, 2019.

The thesis resolved the important scientific task – increase of the human visual analyzer diagnostics efficiency by implementation of the information technology (IT) analysis of the steady-state visual evoked potentials (SSVEP) based on the new developed mathematical model, methods of statistical estimation and identification of diagnostic parameters, decision-making algorithms.

The review determined that most information technologies use an additive model, VEP selection is carried out by averaging of post-stimulus realizations, the decision making is made by comparison of the amplitude-frequency characteristics with the normative values. These facts indicates sources of the improvement in the ophthalmic diagnostics effectiveness through the usage of SSVEP and the consideration of the interconnection between the channels of registration.

The brain electrical activity is a result of a large number of excitatory and inhibitory postsynaptic potential generated synapses at random times. Using the theory of linear random processes, the mathematical model in the form of a linear random process is substantiated. Taking into account the SSVEP registration terms the frequency of impulse generation equals the frequency of the external stimulation periodicity, respectively the intensity of impulse emergence will be periodical. Based on contemplations the mathematical model of two-channeled SSVEP is a two-dimensional linear periodical random process which cyclostationarity of mathematical expectation and correlation function is proved.

Gaussian Signal Distribution hypothesis is confirmed by the histogram analysis and the normality test using the D'Agostino criteria. The stationary of nested sequences taken over a period is confirmed using the Student's and Fisher's criteria. Whereas the mathematical expectation and correlation function of the two-channeled VEP completely determine the probabilistic distribution of the signal, consequently, they were used as a source of informative characteristics.

The orthogonal decomposition based on Chebyshev discrete argument's functions used to identify informative characteristics based on mathematical expectation. To identify the second set of informative characteristics the application of the two-dimensional Karhunen-Loeve decomposition of the two-channel SSVEP's correlation function is considered as a set of eigenvectors of the correlation function.

To implement the classification algorithm, the nearest neighbor method (KNN) was modified by adding the weighting parameters that reflect the importance of the informative characteristics components and using the similarity factor as a metric of the distance between two matrices of eigenvectors. The cross-validation is performed on the input data in order to estimate the KNN parameter values empirically.

The client-server architecture solution and appropriate tools were selected for IT implementation. The obtained results of the SSVEP period estimation coincide with the period of external stimulation, which is one of the arguments for confirming the adequacy of the mathematical model. The results of the two-dimensional Karhunen-Loeve decomposition are analyzed. The corresponding number of eigenvectors of the two-channel SSVEP correlation matrix as the second set of diagnostic parameters is determined by analyzing the decomposition components energy contribution to achieve a given energy threshold (95%). Based on the newly formed complex of diagnostic parameters and using the cross-validation, the optimal parameters for the KNN binary classification algorithm were estimated.

By using software tools and well-grounded algorithms, the effectiveness of the developed IT of the SSVEP analysis, which allows automated ophthalmic diagnostics in conditions not suitable for standard protocols and takes into account the relationship between the registration channels caused by the biophysical human visual analyzer structure, has been proved.

Keywords: steady-state visual evoked potential, two-dimensional linear periodic random process, orthogonal Chebyshev polynomials, Karhunen-Loeve transformation, KNN method, information technology.

Підписано до друку 05.02.2020. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно-друк. арк. 0,9. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 05022020

Друк ФОП Паляниця В. А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528-777.