

УДК 621.38:57.087.1

Я.С. Коротенко, Ю.І. Якименко, д-р техн. наук, академік НАН України, А.О. Попов, канд. техн. наук, Є.С. Карплюк, М.А. Ципарський

## Електроокулографічна система інтерфейсу мозок-комп'ютер

Рассмотрены задачи построения систем связи мозг-компьютер (СМК). Изложены основы построения систем СМК с использованием сигнала электроокулограммы. Предложен способ определения угла поворота глаз по частотно-модулированному сигналу электроокулограммы и представлено программное обеспечение для решения этой задачи.

Problems of brain-computer interface (BCI) systems construction are considered. The fundamentals of constructing BCI systems using the electrooculogram are presented. A method and software for determining eye rotation angle by a frequency-modulated electrooculographic signal processing are given.

**Ключевые слова:** системы связи мозг-компьютер, электроокулография, частотно-модулированный сигнал.

### Вступ

Паралізовані пацієнти, що, наприклад, перенесли інсульт, не мають можливості нормально спілкуватись з оточуючим світом. Хоча когнітивні функції головного мозку продовжують нормально працювати, люди в таких станах мають великі складності в керуванні частинами свого тіла. Створення додаткового каналу комунікації зі світом без використання можливості розмовляти або ворушити частинами тіла для таких людей значно покращить їх рівень життя, а значить і психологічний стан. Розробка та впровадження автоматичних комп'ютерних систем, призначених для таких цілей, бурхливо розвиваються останнім часом в дослідницьких центрах та промислових компаніях по всьому світі.

На сьогоднішній день існує клас систем інтерфейсу мозок-комп'ютер (ІМК), що дозволяють реалізувати різноманітні потреби людей з обмеженими можливостями та в дослідницьких застосуваннях.

Інтерфейс мозок-комп'ютер - це система, яка створена для отримання та аналізу нейронних сигналів з метою організації каналу зв'язку безпосередньо між мозком і комп'ютером. Ці системи застосовуються для вирішення таких задач:

- Біоінженерні застосування: допоміжні пристрої для людей з обмеженими можливостями.
- Діагностика та моніторинг порушень сну, неврологічних захворювань, моніторинг уваги, загального психічного стану.

- Спостереження та аналіз активності нейронів у режимі реального часу за допомогою вивчення кореляції із записаними нейронними сигналами.
- Інтерфейс людина – машина для створення додаткових каналів комунікації між людиною та машиною.

В таких пристроях виконується аналіз різноманітних біологічних сигналів, які використовуються для вироблення керівних команд управління курсором комп'ютера, мотором візка та т.і. [1-2] Подальший розвиток систем ІМК передбачає покращення алгоритмів класифікації сигналу, взаємну інтеграцію систем обробки біосигналів та систем автоматизованого прийняття рішень, розробку інтерфейсів, оптимізованих під конкретні задачі. Задачею даної роботи є розгляд сучасного стану розвитку систем ІМК, що працюють на основі неінвазивної реєстрації біосигналів, та представлення нових результатів в галузі побудови системи ІМК на основі реєстрації сигналу електроокулограми [3-4].

### 1. Загальні засади побудови ІМК

В даний час основними задачами, що вирішують дослідники систем ІМК:

- Отримання сигналів мозкової (нейроної) активності: розвиток як інвазивних, так і неінвазивних методів отримання якісного сигналу високої чіткості.
- Алгоритми обробки отриманих сигналів: покращення алгоритмів машинного навчання та обробки сигналів, забезпечення оперативної обробки в режимі реального часу.
- Поглиблене вивчення неврології: краще розуміння функцій нейронної анатомії, фізіології і зв'язку зі сприйняттям і пізнанням.

В даний час системи ІМК використовують біосигнали для управління рухом курсору, вибору літери або зображення, контролю психічного стану. Центральним елементом у кожному ІМК системі є алгоритм, що трансформує електрофізіологічні дані, введені користувачем, у вихідні, які керують зовнішніми пристроями. Продуктивність ІМК системи залежить від ефективної взаємодії між двома адаптивними суб'єктами: користувач, який опосередковано кодує психологічний стан в електрофізіологічні показники, представлені до аналізу ІМК, і комп'ютер, який

розпізнає патерни і трансформує їх в команди керування цільовим пристроєм.

Слід зазначити, що система, що претендує на використання в сучасних умовах має аналізувати групу показників, таким чином щоб класифікувати нейропсихологічний стан об'єкта якомога краще у відповідності до найхарактернішого показника з групи. Наразі в системах ІМК використовують такі методи збору інформації про стан об'єкта:

- Електрокортикографічні сигнали. Використовуються сигнали від одного чи невеликої групи нейронів поверхні кори мозку. У більшості випадків найбільш оптимальний варіант для розміщення електродів – розташування в області моторної кори, через її безпосереднє відношення до областей моторної діяльності.
- Викликані потенціали (ВП) мозку. Ці сигнали є потенціалами мозку, які викликані сенсорними стимулами. Вони, як правило, отримані шляхом усереднення великої кількості коротких ділянок електро-енцефалограми (ЕЕГ), які зареєстровані після стимулів. Використання ВП практично не вимагає навчання пацієнта застосуванню ІМК за рахунок того, що відповідні реакції на стимул вже присутні в сигналі ЕЕГ. Характерною вимогою до викликання і реєстрації ВП є регулярність стимуляції за часом. Реакція на стимуляцію, як правило, виглядає як пік позитивної хвилі на 200 мс та негативної хвилі на 100 мс після стимуляції.
- Аналіз активності та локалізації типових видів хвиль в ЕЕГ. Розглядають активності таких мозкових хвиль, як альфа- та мію-хвилі (частотний діапазон від 8 до 14 Гц).
- Аналіз амплітудних та часових показників електроокулограми (ЕОГ).

Найбільш простою в використанні вважається система на основі аналізу електроокулографічних сигналів, оскільки ці сигнали порівняно легко реєструвати, вони мають амплітуду, вищу за амплітуду сигналів ЕЕГ та ВП, а також можлива безпосередня інтерпретація сигналів ЕОГ в системах ІМК. Розглянемо більш докладно можливості використання сигналу ЕОГ для побудови систем ІМК.

## 2. Використання ЕОГ в системах ІМК

Електроокулографія – це методика вимірювання потенціалу спокою сітківки. З метою належного збору інформації, електроди повинні бути ретельно розташовані або вище очей або ліворуч і праворуч від очей. Якщо око переміщується з

центральної позиції у напрямку одного з електродів, цей електрод реєструє позитивний заряд сторони сітківки, а протилежний електрод – негативно заряджену сторону роговиці (Рис. 1). Отже, виникає різниця потенціалів між електродами. Ця різниця потенціалів називається різницею потенціалів рогівки-сітківки, що обумовлена гіперполяризацією та деполіаризацією тканин ока. Виходячи з цього, рух очей можна моделювати як рух диполя. ЕОГ-сигнали змінюються з горизонтальними і вертикальними рухами очей, так 1° горизонтального руху викликає зміну потенціалів приблизно рівну 16 мкВ, а вертикальний рух на цей же кут – 14 мкВ. Існує лінійна залежність між величиною сигналу ЕОГ і кутом зміни напрямку зору, який змінюється по горизонталі на  $\pm 45^\circ$  і по вертикалі на  $38.7^\circ$  та  $30.7^\circ$ .

Частотна смуга ЕОГ знаходиться в межах 0-100 Гц, амплітуда цього сигналу може бути від 50 до 3500 мкВ. Зміни потенціалів в залежності від руху очей або моргання достатньо легко помітити навіть без проведення додаткової обробки, що відкидає потребу в складних математичних перетвореннях, яких потребує аналіз ЕЕГ або ВП. ЕОГ найбільш часто використовують для оцінки функції пігментного епітелію. На практиці також проводять запис руху очей для подальшого аналізу стану очей, нервової системи, психічного стану об'єкта, вивчення фаз сну.

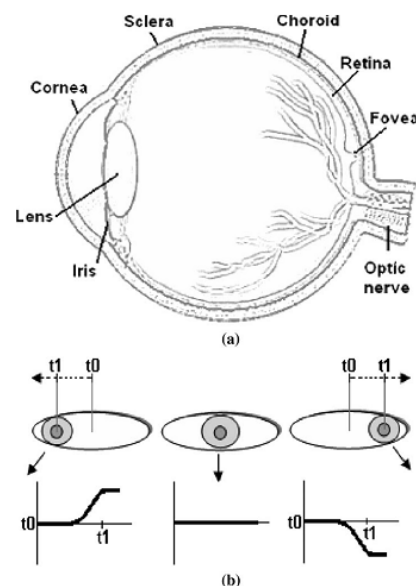


Рис. 1. Схематичне зображення ока та сигналів ЕОГ

При використанні ЕОГ електроди накладають близько до очної западини впродовж або поперек поздовжньої осі ока. В якості референтного електрода використовують електрод, підключений до мочки вуха або накладений на лоб.

В даній роботі запропоновано в якості програмного процесора обробки сигналу ЕОГ вико-

ристовувати персональну ЕОМ, що значно спрощує процес розробки програмного забезпечення і розширює можливий об'єм використання у зв'язку з доступністю ЕОМ для пересічних користувачів. Тому в якості аналогово-цифрового перетворювача запропоновано використовувати АЦП звукової карти. Сучасні звукові карти мають специфічні обмеження нижньої границі частотного діапазону, що викликано необхідністю знизити рівень шумів мікрофонів. Через те, що спектр ЕОГ включає частоти менше 100 Гц, пропонується використати частотну модуляцію сигналу при передачі. Таким чином, для реалізації апаратної частини розроблено підсилювач біопотенціалів, систему фільтрів та частотний модулятор. Виходячи з параметрів модулятора та параметрів ЕОГ пропонується загальний коефіцієнт підсилення схеми обрати рівним 5000.

### 3. Методика визначення повороту очей в системі ІМК

Як вже було зазначено, розроблена система зв'язку мозок комп'ютер використовую в якості АЦП можливості сучасних ЕОМ, а саме можливість обробки сигналів аналогового входу звукової карти. Обраний варіант аналогово-цифрового перетворення разом з частотними

обмеженнями звукових карт призводять до необхідності додаткової модуляції інформаційного сигналу для забезпечення повноти аналізу для всього діапазону обраних частот.

Обробка інформаційного сигналу проходить в режимі реального часу з можливою частотою дискретизації від 8 кГц до 48 кГц і роздільною здатністю одного відліку від 8 до 24 біт залежно від попередніх налаштувань.

Для отримання спектральної характеристики сигналу над ним проводиться пряме перетворення Фур'є. Результат - миттєвий спектр, який наведено на рис. 2.

На миттєвій спектральній характеристиці присутній ряд максимумів, серед яких максимум на частоті роботи розрахованого модулятора. Миттєве значення частоти максимуму лежить в околі 2.5 кГц, а можливе відхилення +/- 2 кГц викликано зміною інформаційного сигналу ЕОГ. Таким чином, реєструючи миттєве значення частоти піку на робочому проміжку спектральної характеристики отримаємо початковий інформаційний сигнал ЕОГ. Отже, можливе однозначне перетворення вихідної частоти модулятора в значення кута відхилення оцей. Приклад результуючого графіка кута відхилення очей з плином часу наведено на рис. 3.

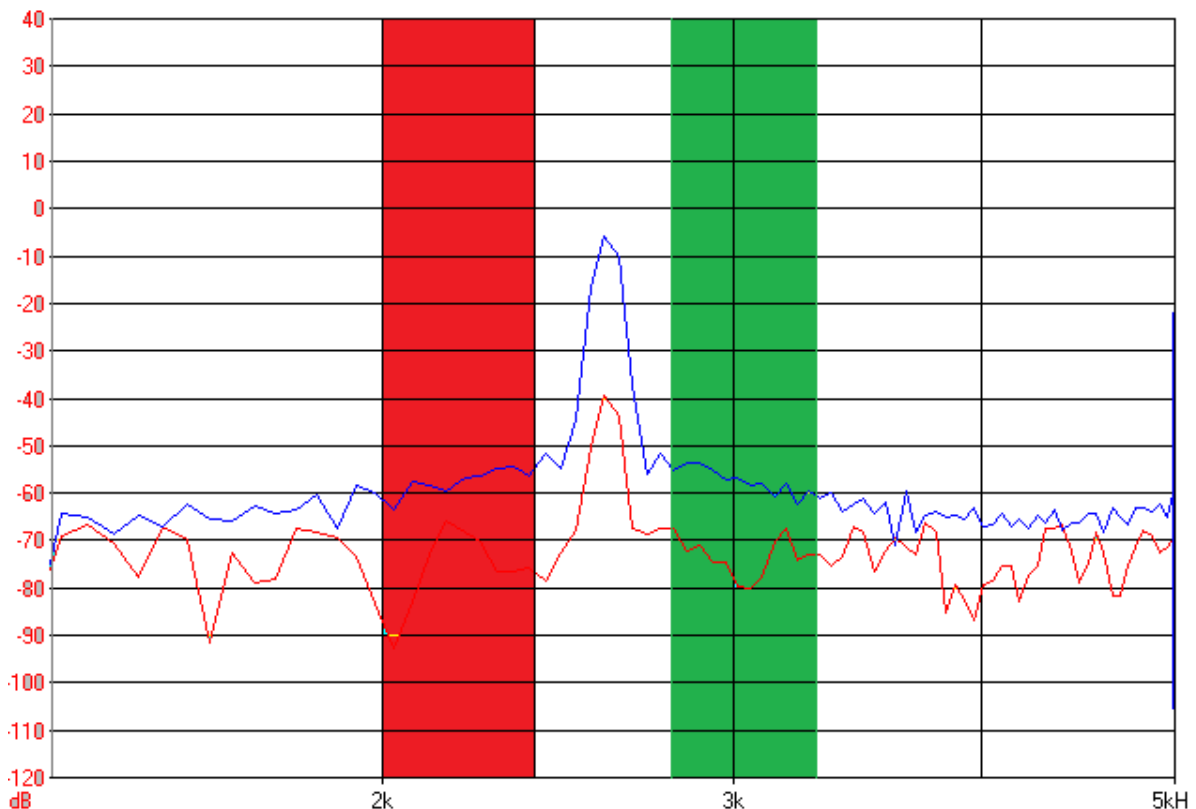


Рис. 2. Миттєвий спектр інформаційного сигналу, позначено зони відхилення частоти піку

Програмне забезпечення (ПЗ) електронної системи зв'язку мозок – комп'ютер, що обробляє сигнали ЕОГ, розроблене для роботи в середовищі сімейства операційних систем Windows 98/Me/2000/XP/Vista/7. Доступ до даних, отриманих з фізичного порту аналогового входу звукової картки виконано за допомогою WinAPI функцій WaveIn. Доступ до технології WinAPI є стандартизованим, що з певною вірогідністю надає можливість прогнозувати коректну роботу програмного забезпечення електронної системи зв'язку мозок – комп'ютер на всій лінійці Win32.

ПЗ електронної системи зв'язку мозок – комп'ютер розроблене за допомогою мови високого рівня Delphi, яка дозволяє ідентифікацію

типу даних з можливістю доступу до метаданих класів (тобто до опису класів та їх членів) у компільованому кодї.

Вікна налаштування програми та налаштування класифікатора наведені на рис. 4 - 5.

Розроблене ПЗ дозволяє використовувати сигнал ЕОГ не тільки визначення куту відхилення ока, а і для керування зовнішніми приладами в випадках, що задовольняють розробленим вимогам до подій (наприклад достатній кут відхилення ока розглядається як подія, що викликає рух комп'ютерного курсора в відповідну сторону). В якості реакції на подію може бути зміщення курсора «миші», емуляція натискання кнопок клавіатури, виконання зовнішніх програм та об'єднання зазначених реакцій.

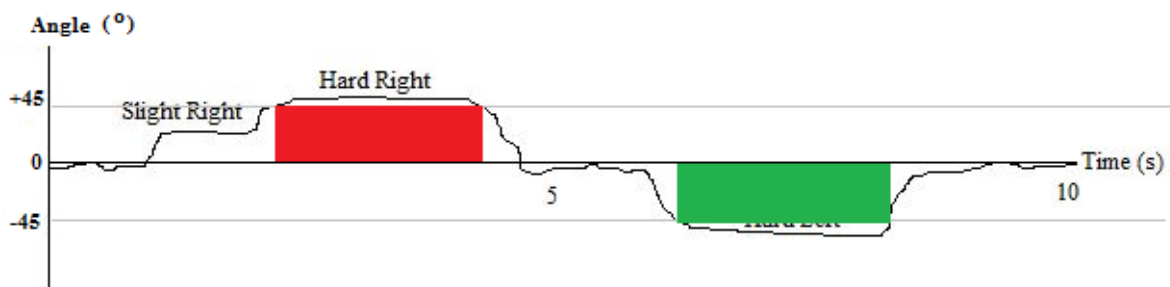


Рис. 3. Залежність кута повороту ока від часу та позначення зон, що відповідають зміщенню піку на рис. 2

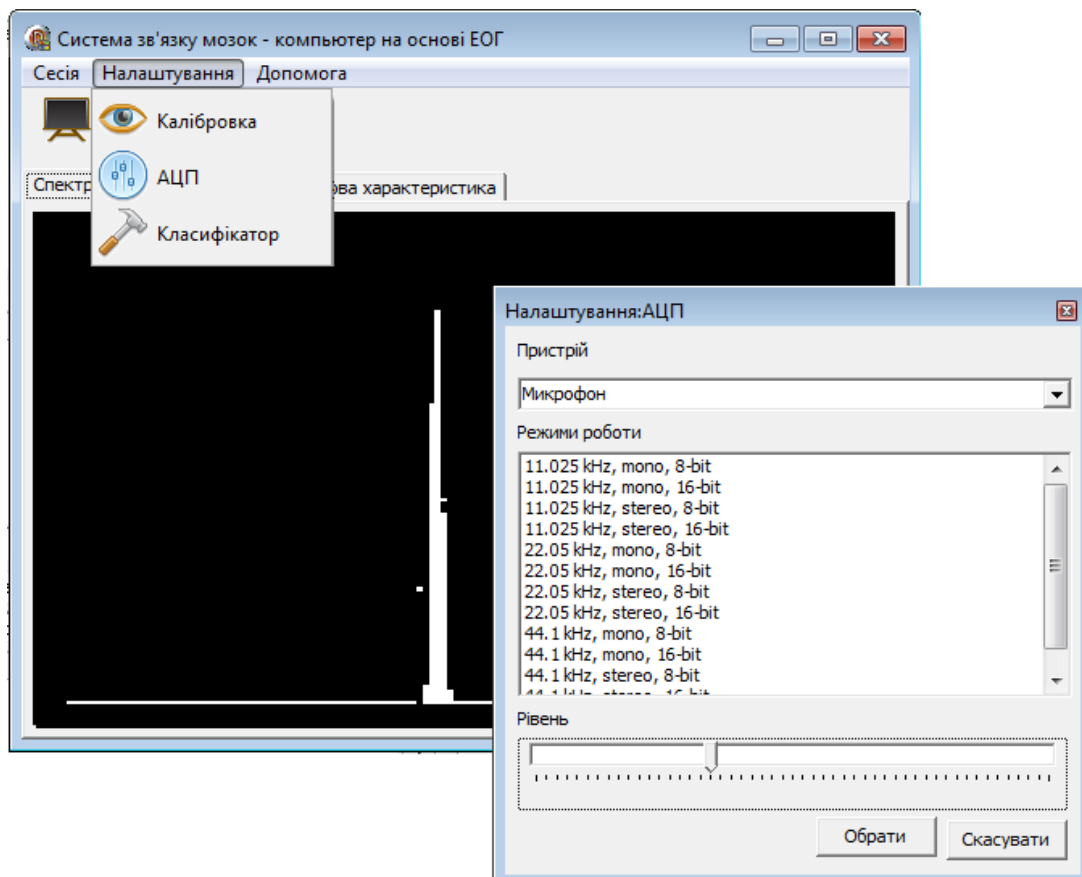


Рис. 4. Вид вікна налаштування програми

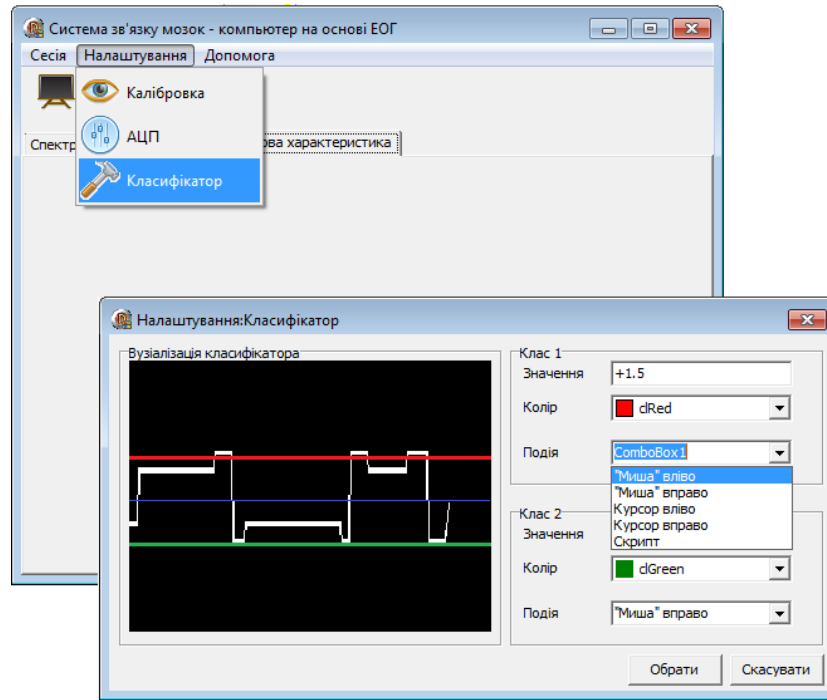


Рис. 5. Вид вікна налаштування класифікатора

## Висновки

В роботі зроблено огляд основних підходів до побудови систем ІМК. Розглянуто засади використання сигналу електроокулограми для створення системи керування курсором комп'ютера. Запропоновано спосіб визначення кута повороту очей в системі ІМК з використанням модулятора без проведення оберненого перетворення Фур'є частотно-модульованого сигналу, а безпосередньо в спектральній області. Перевагою розробленої системи є можливість її інтеграції до більш складних програмно-апаратних комплексів ІМК.

## Література

1. *Ali Bulent Usakli*, Design of a Novel Efficient Human-Computer Interface: An Electrooculagram Based Virtual Keyboard / Ali Bulent Usakli, Ser-

kan Gurkan // IEEE Transaction on Instrumentation and measurement. vol. 59, № 8, 2010.

2. *Paolo Inchingolo*, On the Identification and Analysis of Saccadic Eye Movements-A Quantitative Study of the Processing Procedures / Paolo Inchingolo and Massimo Spanio // IEEE Transaction on biomedical engineering, vol. BME-32, №9, 1985.
3. Съём биопотенциалов с электродов медицинских приборов// ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ КОМПАНИИ ANALOG DEVICES, № 8, август 2008, 6
4. <http://openeeg.sourceforge.net/> The open-source Electroencephalography project

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»