



В. І. Дубровін¹, К. С. Паничук², К. О. Роговська³, Ю. В. Тарасова⁴

¹к.т.н., професор кафедри програмних засобів,
Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна,
e-mail: vdubrovin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0848-8202

²студентка групи КНТ-130, Національний університет «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна, e-mail: panichuck.kat@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-4340-6688

³IOS Developer IT-компанії «Roll'n'Code», Запоріжжя, Україна, e-mail: katrin.riano@gmail.com

⁴к.т.н., Web Developer IT-компанії «Freshcode», Запоріжжя, Україна, e-mail: julia.tverdohle@gmail.com

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ АУДІОВІЗУАЛЬНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ ГОЛОВНОГО МОЗКУ

Аудіовізуальна стимуляція мозку, як сучасний підхід до впливу на нейрофізіологічні процеси, надає великий потенціал для поліпшення психічного та фізичного здоров'я людини, а також діагностики та лікування різних порушень. Використання перетворень Фур'є та вейвлет-перетворень дозволяє аналізувати сигнали електроенцефалограм та електрокардіограм і створювати ефективні світлові та аудіостимули. Розглядаються наявні дослідження, які підтверджують важливість біоелектричної активності людини та методів її обробки у виконанні аудіовізуальної стимуляції для лікування різноманітних захворювань у дорослих та дітей. Наведено підхід до програмної реалізації методів аудіовізуальної стимуляції головного мозку та результати розробки. Тестування програмного забезпечення продемонструвало позитивний вплив світлових та аудіостимулів на більшість учасників дослідження. Це свідчить про важливість і перспективи подальших досліджень у цьому напрямку.

АУДІОВІЗУАЛЬНА СТИМУЛЯЦІЯ, ЕЕГ, ЕКГ, ЦЕНТРАЛЬНА НЕРВОВА СИСТЕМА, ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, ВЕЙВЛЕТ–ПЕРЕТВОРЕННЯ, MATLAB, ARDUINO

V. Dubrovin, K. Panychuk, K. Rohovska, Y. Tarasova. Software implementation of audiovisual brain stimulation methods. Audiovisual brain stimulation, as a modern approach to influencing neurophysiological processes, has great potential for improving mental and physical health, as well as diagnosing and treating various disorders. The use of Fourier transforms and Wavelet transforms allows analyzing signals from electroencephalograms and electrocardiograms and creating effective light and audio stimuli. The available studies confirming the importance of human bioelectrical activity and methods of its processing in the implementation of audiovisual stimulation for the treatment of various diseases in adults and children are considered. The approach to the software implementation of audiovisual brain stimulation methods and the results of its development are presented. Software testing has demonstrated a positive effect of light and audio stimuli on the majority of the study participants. This indicates the importance and prospects for further research in this area.

AUDIOVISUAL STIMULATION, EEG, ECG, CENTRAL NERVOUS SYSTEM, FOURIER TRANSFORM, WAVELET TRANSFORM, MATLAB, ARDUINO

Вступ

В сучасному світі багато людей страждають від різних психічних і фізичних захворювань. Дефіцит ефективних та нефармакологічних методів лікування стає однією з актуальних проблем сучасної медицини. Важливою є необхідність створення терапій, що взаємодіють з організмом природним способом, активуючи його внутрішні резерви. Методи, які впливають на обмін речовин, регуляторні системи, адаптацію та компенсацію, мають великий потенціал [1]. Один із таких методів, що набуває все більшої популярності в медичній спільноті, – це аудіовізуальна стимуляція (АВС). Вона сприяє мобілізації природних резервів організму за допомогою світлових та акустичних впливів і є гарною альтернативою в боротьбі з численними хворобами та станами, де традиційні методи не завжди дають бажаний результат.

Серед таких хвороб варто зазначити депресію та тривожність, що стали актуальними в сучасному

суспільстві. Аудіовізуальна стимуляція може допомогти пацієнтам знижувати рівень тривожності та відновлювати спокій. Крім того, вона є корисною для пацієнтів із порушеннями сну, такими як безсоння [2]. Регулюючи мозкову активність, аудіовізуальна стимуляція сприяє покращенню якості сну та відновленню внутрішнього біологічного годинника.

Застосування аудіовізуальної стимуляції також розглядається у лікуванні синдрому дефіциту уваги з гіперактивністю (СДУГ), де може бути корисною для поліпшення концентрації та розумової діяльності. Ця методика також вивчається для реабілітації пацієнтів з травмами мозку, а також для підтримання мозкової активності та нейропластичності в лікуванні нейродегенеративних захворювань, таких як хвороба Паркінсона та хвороба Альцгеймера [3].

Отже, аудіовізуальна стимуляція відкриває перспективи для покращення психічного та фізичного здоров'я і дає нові можливості в лікуванні та реабілітації.

1. Біологічні ритми людини

Одними з найважливіших біологічних показників людини для виконання аудіовізуальної стимуляції є ритми мозку та серця. Для реєстрації біопотенціалів мозку використовується електроенцефалографія (ЕЕГ), а для реєстрації електричної активності серця – електрокардіографія (ЕКГ).

Електроенцефалограма є важливим інструментом для дослідження патологій центральної нервової системи, пов'язаних із судомними та зміною психічного стану [4]. Вона є додатковим тестом до більш складних візуалізаційних досліджень. ЕЕГ широко використовується для оцінки пацієнтів з епілепсією, зміненим психічним статусом або зміненою свідомістю, парасомніями, енцефалопатіями, вторинними по відношенню до різних метаболічних порушень та інтоксикацій, деменціями та інсультами, що протікають у вигляді судомних нападів [4]. ЕЕГ також корисна для визначення прогнозів у пацієнтів з аноксичним ураженням мозку, черепно-мозковими травмами, визначення смерті мозку та медикаментозної інтоксикації. ЕЕГ є універсальним інструментом для оцінки будь-якої інтервальної активності мозкових хвиль і для кращого розуміння основного прогресу у людини, яка не реагує або перебуває в комі. Вона також корисна для оцінки пацієнтів з поведінковими або психогенними розладами, які схожі на судомні напади.

Основні ритми мозку (рис. 1) – це альфа- (частота від 8 до 13 Гц, амплітуда 15-100 мкВ), бета- (частота від 13 до 35 Гц, амплітуда 3-10 мкВ), дельта- (частота від 0,3 до 4 Гц, амплітуда 20-30 мкВ), тета- (частота від 4 до 8 Гц, амплітуда до 40 мкВ), і гамма-ритм (частота від 35 до 500 Гц, амплітуда зазвичай до 10 мкВ) [5].


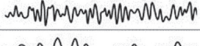



ЕЕГ сигнал	Назва груп хвиль	Частота хвилі, Гц	Фізичний стан людини
	Gamma	35-500	Висока розумова активність
	Beta	13-35	Тривога
	Alpha	8-13	Розслаблення
	Theta	4-8	Рання стадія сну
	Delta	0,3-4	Глибокий сон

Рис. 1. Діапазони частот хвиль мозкової активності, що характеризують фізичний стан людини [2]

Альфа-ритм максимально виражений в задніх (потиличних) відведеннях при закритих очах. Альфа-хвилі пов'язані з умінням людини розслабитися, здатністю долати стрес, а також засвоювати нову інформацію. У нормі відзначається зниження альфа-ритму на ЕЕГ при розплющенні очей, занепокоєнні, при активній розумовій діяльності, а також під час сну [5].

Бета-ритм має максимальну вираженість в лобово-центральному відведенні. Він посилюється в період сонливості, при засинанні та іноді при пробудженні.

В період глибокого сну амплітуда і вираженість бета-ритму істотно знижується. Посилення активності бета-ритму відзначається при прийомі психоактивних препаратів. Регіональне зниження бета-ритму одночасно зі зниженням альфа-ритму може говорити про структурне ушкодження або дефект кори головного мозку [5].

Максимальна вираженість тета-ритму зустрічається у дітей 4-6 років. Він може реєструватися на ЕЕГ здорової притомної людини під час емоційної активації. Однак існує безліч патологічних станів або змінених станів свідомості (сон, медитація), що супроводжуються розвитком довготривалої і короткочасної тета-активності, більшість з яких вимагає проведення нейровізуалізації [5].

Дельта-ритм реєструється під час глибокого сну, при гіпервентиляції або в стані наркозу. Домінування дельта-активності у підлітків і дорослих в стані неспання – ознака патології. Виявляється у пацієнтів з наявністю енцефалопатій, що супроводжуються змінами рівня свідомості (кома), а також є ознакою важкого структурного мозкового порушення (пухлина, інсульт, травма, абсцес). В поодиноких роботах зустрічається інформація, що коливання в цьому діапазоні можуть бути ідентифіковані в сигналі ЕЕГ у стані спокою при деяких формах стресу [5].

Гамма-ритм спостерігається під час високої розумової активності, такої як навчання, сприймання інформації, а також розв'язання складних завдань. Реєструється в прецентральному, фронтальному, скроневій і тім'яній зонах кори головного мозку [6].

Отримані ритми ЕЕГ фільтруються та аналізуються для подальшого створення звукових доріжок та налаштування світлових стимулів, які використовуються під час аудіовізуальної стимуляції.

ЕКГ – це неінвазивний метод діагностики, який має значний клінічний вплив на дослідження тяжкості серцево-судинних захворювань [7]. ЕКГ все частіше використовується для моніторингу пацієнтів, які приймають антиаритмічні препарати та інші ліки, як невід'ємна частина передопераційної оцінки пацієнтів, яким проводять некардіохірургічні операції, а також для скринінгу осіб, які займаються професіями з підвищеним рівнем ризику та/або спортом. Крім того, ЕКГ слугує інструментом дослідження для спостереження та експериментальних випробувань ліків з визнаними кардіологічними ефектами [7].

Під час реєстрації електричної активності серця на електрокардіограмі присутні такі складові (рис. 2), як Р – зубець, що відображає перебіг поширення збудження передсерддями; інтервал Р-Q – час від початку збудження передсердь до початку збудження шлуночків; інтервал Q-T – час електричної систоли шлуночків, що включає поширення збудження шлуночками серця – комплекс QRS, сегмент ST і зубець

T; хвиля U, яка в нормі спостерігається не завжди; R-R (P-P) – міжцикловий інтервал; T-P – діастолічний інтервал [8].

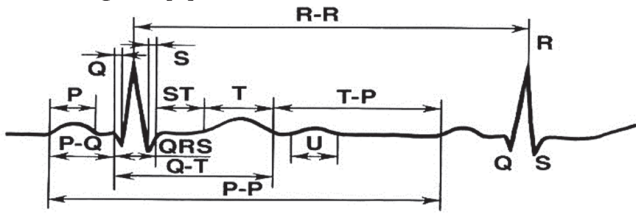


Рис. 2. Схематичне зображення нормальної електрокардіограми [8]

Електрокардіограми також використовуються для створення звукових доріжок, які застосовуються під час АВС.

Використання електроенцефалографії (ЕЕГ) та електрокардіографії (ЕКГ) при аудіовізуальній стимуляції головного мозку дозволяє створювати індивідуалізовані стимули та ефективно оцінювати їх вплив на мозкову і серцеву активність. Завдяки синергії цих методів можна отримати комплексну картину фізіологічних реакцій організму, що сприяє розробці оптимальних програм для релаксації, покращення когнітивних функцій та лікування різних психічних і фізичних розладів.

2. Цифрова обробка сигналів

Використання перетворення Фур'є та вейвлет-перетворень стало важливою складовою аналізу електроенцефалограм та електрокардіограм. Перетворення Фур'є дозволяє розкласти сигнали на їхні складові частоти, допомагаючи виявити основні ритми та характеристики активності мозку та серця. Вейвлет-перетворення, з іншого боку, надають додаткову інформацію про часові та частотні властивості сигналів, що дозволяє виявляти короточасні зміни та артефакти.

Перетворення Фур'є – це дослідження функції на наявність у ній гармонічної складової, що має частоту ω , та визначення комплексної ваги цієї складової (амплітуди, початкової фази) у вибраній системі координат [9].

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (1)$$

Формула перетворення Фур'є (1).

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (2)$$

Функцію $f(t)$, яка визначається формулою (2), називають зворотним перетворенням Фур'є [9].

Вейвлети – це математичні функції, що дозволяють аналізувати різні частотні компоненти даних. Вейвлети мають істотні переваги в порівнянні з перетворенням Фур'є, тому що вейвлет-перетворення дозволяє робити висновки не тільки про частотний

спектр сигналу, але також про те, в який момент часу з'явилася та чи інша гармоніка [10].

Сигнал аналізується шляхом розкладання за базисними функціями, які було отримано з деякого прототипу шляхом стиснень, розтягувань і зсувів (3). Функція-прототип називається аналізуючим (материнським) вейвлетом [11].

Вейвлет-функція повинна задовольняти двом умовам [11]:

1. Середнє значення (інтеграл усією прямою) дорівнює 0. (Тобто, перші m моментів рівні 0, причому значення кількості моментів і вважається порядком вейвлета).

2. Функція швидко спадає при $t \rightarrow \infty$, де t – вісь часу.

Для точного вейвлет-аналізу застосовуються функції, що володіють достатньою гладкістю [11].

У загальному випадку вейвлет-перетворення функції $f(t)$ виглядає так:

$$W(x, s) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^* \left(\frac{t-x}{s} \right) f(t) dt, \quad (3)$$

де Ψ – функція-вейвлет, t – вісь часу, x – момент часу, s – параметр, зворотний частоті, * – комплексно-поєднане [10].

Використання перетворення Фур'є та вейвлет-перетворень допомагає виявляти аномалії, вивчати динаміку певних станів, таких як епілепсія чи аритмія, та вдосконалювати методи діагностики та моніторингу пацієнтів у медичній сфері.

Саме за допомогою результатів цих методів створюються світлові та аудіостимули в АВС.

3. Наявні дослідження та їхні результати

У дослідженні [12] було проведено аналіз опублікованих даних, який показав, що майже всі дослідження ефектів АВС, у тому числі [13–17], проводилися без врахування власних біоелектричних потенціалів піддослідного. У той же час у деяких публікаціях розповідається про дуже перспективний, але недостатньо вивчений підхід до організації різних видів стимуляції – методологія, коли сенсорні подразники автоматично підлаштовуються під поточні біоелектричні процеси [18–20].

Порівняння ефектів цих двох підходів до виконання АВС також було виконано у цьому дослідженні [12]. У ньому взяли участь 18 осіб (8 жінок і 10 чоловіків, 48–65 років), які скаржилися на стан психоемоційного напруження та стресу. Було проведено два експерименти.

У першому експерименті добровольцям було продемонстровано АВС, що складалася з світлових та аудіостимулів, які генерувалися трансформацією поточних параметрів ЕЕГ і серцевого ритму піддослідних. У другому експерименті використовували

задалегідь підготовлену композицію світлових та аудіостимулів без використання керуючих сигналів зворотного зв'язку від поточної біоелектричної активності піддослідних.

Було встановлено, що найбільш виражені зрушення об'єктивних та суб'єктивних показників (максимальне зростання потужності альфа-ритму ЕЕГ щодо фону, позитивні емоційні реакції та зрушення функціонального стану організму) відзначаються у випадках, коли управління АВС здійснюється безпосередньо власними електрофізіологічними характеристиками піддослідних [12].

Середні значення та стандартні відхилення параметрів у двох експериментах, рівень значущості p цих зрушень та достовірність відмінностей (p) між зрушеннями в експерименті та в контролі наведені в табл. 1. Жирним шрифтом виділені значення зрушень з рівнем значущості $p < 0,05$ [12].

Таблиця 1 [12]

Параметр	Експеримент				p контр. /екс- пер.
	контроль		експеримент		
	зрушення	p	зрушення	p	
α -ритм ЕЕГ, відн. од.	12,3 ± 23,5	0,042	22,9 ± 26,3	0,002	0,272
Тест САН, самопочуття, бали	0,4 ± 4,6	0,725	5,0 ± 3,2	0,001	0,002
Тест САН, активність, бали	0,3 ± 4,1	0,782	2,3 ± 5,3	0,079	0,224
Тест САН, настрої, бали	1,1 ± 4,4	0,301	4,7 ± 2,2	0,001	0,014
Тест РЕД, емоційна дезадаптація, бали	-0,3 ± 1,8	0,523	-0,7 ± 1,2	0,023	0,367
Тест РС, рівень стресу, бали	-0,1 ± 1,5	0,762	-0,9 ± 1,1	0,003	0,039

Ці ефекти є результатом залучення інтероцептивних механізмів у систему механізмів, що відповідають за нормалізацію функціонального стану людини під впливом АВС, тобто механізмів мультисенсорної інтеграції, нейропластичності та резонансних механізмів мозку [12].

У публікації [21] було виконано огляд наявних публікацій (чотирнадцять статей (188 учасників) і два огляди літератури) та представлено узагальнення результатів, яке показує, як АВС впливає на пацієнтів з геміанопсією, а саме на зорову окоорухову функцію, функціональну здатність у повсякденному житті, геміаноптичну дислексію, зорове сканування

та пошукові завдання, підтримання функціональної здатності після тренування та вплив на мультисенсорну інтеграцію мозку за допомогою нейровізуалізації.

Гомогенна геміанопсія (ГГ) — це дефект поля зору, який визначається повною або частковою сліпотою в полях зору з правого або лівого боку обох очей, найчастіше спричинений інфарктом головного мозку [22].

Можливість викликати тривале покращення після АВС у дітей з хронічним ГГ внаслідок набутих уражень головного мозку вивчалася лише в одному дослідженні [23]. У ньому взяли участь троє дітей (один хлопчик і дві дівчинки віком від 9 до 17 років). Тренування тривали півтори години щодня протягом 4 тижнів. Показниками результату були правильна кількість візуальних розпізнавань, здатність до візуального пошуку та швидкість читання. Тест візуального пошуку складався з шести різних підтестів: яблуко, жаба, посмішка, літери Е-Ф, трикутник і числа [23]. Кожного учасника тестували до і після періоду тренування, а також після періоду спостереження протягом 1 місяця, а в одному випадку подальше спостереження було проведено через 12 місяців.

Автори побачили помітне поліпшення у виявленні та часі реакції лише тоді, коли суб'єкти використовували дослідницькі рухи очима, а не фіксували погляд на центральній точці [23]. Це свідчить про те, що покращення зорового сприйняття, викликане тренуванням, опосередковується окооруховою системою, що посилює орієнтацію в сліпому півполі. У всіх тестах основний фактор сесії був значущим, коли розглядався час відповіді [23].

Покращення швидкості читання після тренування спостерігалось для читання одного слова у всіх піддослідних. Результати цього дослідження підтвердили, що АВС може також сприяти активації зорової реакції окоорухової системи у дітей та підлітків з дефектами полів зору, оскільки поведінка зорового пошуку стала більш ефективною та швидкою після лікування.

Автори публікації [23] стверджують, що це свідчить про важливу роль мультисенсорної інтеграції в цьому типі очної компенсації і в пластичності зорової системи при наявності «сліпоти», навіть при повному пошкодженні потиличної кори. Довготривалий ефект лікування був зафіксований як в 1-місячних, так і в 12-місячних контрольних тестах [23].

4. Програмне забезпечення

Програмне забезпечення (ПЗ) повинно проводити зчитування стандартизованого файлу ЕЕГ, відображати основні ритми мозку графічно, дозволяти апроксимувати та фільтрувати сигнал, мати змогу виділяти основні ритми головного мозку, транслювати

їх в обраний аудіофайл та генерувати синхронні світлові імпульси.

Крім того, повинні бути відображені дані з підключення апаратної частини та її готовності до роботи. Пропонована схема аудіовізуальної стимуляції представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема аудіовізуальної синхронізації мозкових хвиль

Оскільки головною метою програмного забезпечення є його універсальність для різних груп користувачів з різними порушеннями центральної нервової системи, в роботі з сигналами ЕЕГ використовуються

моноуральні ритми, які сприймаються незалежно від емоційного та фізичного стану особи. Це значно спрощує апаратну синхронізацію звуку та світла.

Розроблене ПЗ має дві програмовані частини – основну програму на ПК, яку було розроблено за допомогою MATLAB, та апаратну частину, реалізовану з використанням мікроконтролера Arduino Nano (рис. 4).

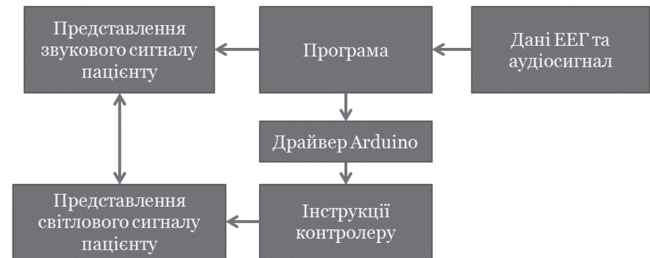


Рис. 4. Взаємодія компонентів

За допомогою лаконічного та мінімалістичного, але зрозумілого інтерфейсу (рис. 5) реалізована наочність характеристик сигналу, що буде оброблюватися.

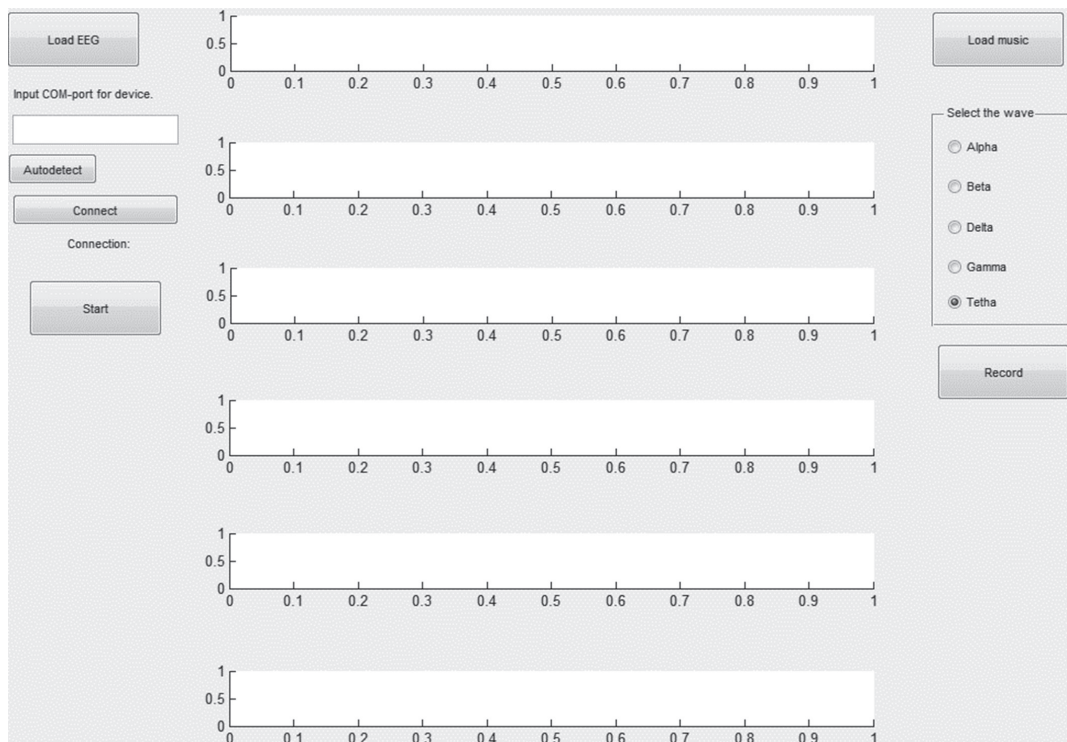


Рис. 5. Інтерфейс програми

Використання в якості носія сигналу моноуральних ритмів спрощує синхронізацію програми на ПК та на мікроконтролері, внутрішня пам'ять якого обмежена 16 Кб.

Перед трансляцією сигнал енцефалограми повинен бути відфільтрований та розділений на необхідні хвилі. Застосування фільтрації дозволить компенсувати спотворення даних, які неминуче виникають при використанні сучасних енцефалографів. Ці спотворення можуть бути обумовлені різними

факторами, від взаємного перекривання потенціалів відведень до мимовільних рухів пацієнта, тому необхідно підібрати гнучкий метод фільтрації, який можна буде використовувати незалежно від причини виникнення шуму.

Саме таким методом на цей час є вейвлет-аналіз. Для виконання фільтрації сигналу обрано сімейство вейвлетів Добеши, загальний вигляд носія яких представлено на рис. 6.

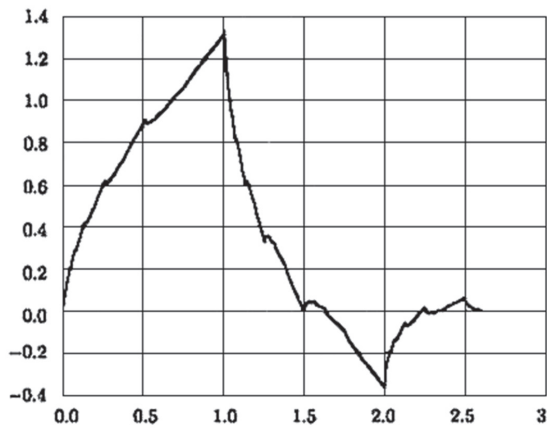


Рис. 6. Вейвлет Добеші 2-го порядку

Існує ряд процедур порогової обробки коефіцієнтів деталізації. Введемо в розгляд лише м'який і жорсткий трешолдинги, запропоновані Д. Донохо і І. Джонстоном (D. Donoho, I. Johnstone) на початку 90-х років.

Використання м'якого трешолдингу означає перерахунок коефіцієнтів деталізації $\{d_{j,k} | k \in Z\}$ наступним чином:

$$d_{j,k}^s = (|d_{j,k}| - \tau) \text{sign}(d_{j,k}). \quad (4)$$

Тоді як процедура жорсткого трешолдингу не дає ніяких допусків на значення коефіцієнтів:

$$d_{j,k}^h = d_{j,k} I(|d_{j,k}| > \tau). \quad (5)$$

У розробці використано м'який трешолдинг згідно з формулою (4), оскільки деякі відхилення сигналів енцефалограми (що не є шумом, але достатньо малі, щоб бути відфільтрованими жорстким методом порогової обробки) мають значущий потенціал для корегування та синхронізації мозкових хвиль.

Після фільтрації необхідно здійснити виділення ритмів мозку (альфа, бета, гамма, дельта та тета). Для цього використовуються двосмугові фільтри Баттерворта.

Фільтр Баттерворта проектується таким чином, щоб його амплітудно-частотна характеристика була максимально гладкою на частотах смуги пропускання. Аналогічно до інших фільтрів, при розгляданні частотних характеристик використовують фільтр низьких частот, з якого легко можна отримати фільтр високих частот. За допомогою послідовної комбінації декількох таких фільтрів можна створити смуговий або режекторний фільтр.

Амплітудно-частотна характеристика $G(\omega)$ фільтра Баттерворта n -го порядку може бути отримана з передавальної функції $H(s)$:

$$G^2(\omega) = |H(j\omega)|^2 = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}, \quad (6)$$

де n — порядок фільтра, ω_c — частота пропускання, G_0 — коефіцієнт посилення нульової компоненти.

Таким чином, він здатний виділяти частоти, задані двома граничними значеннями, що дуже зручно для відокремлювання діапазону хвиль (наприклад, альфа-ритми мають основні частоти 8–13 Гц).

Отримані хвилі накладаються на аудіо- та візуальну компоненти стимуляції, що синхронно транслюватимуться користувачу.

В тестуванні роботи створеної системи прийняли участь 30 людей віком від 18 до 55 років, кожному з них було представлено вибір музики для обробки. На обрані звукові файли було накладено певні частоти ритмів мозку, і учасники мали прослуховувати музику протягом 14 днів по 10 хвилин на день, займаючись повсякденними справами чи знаходячись у розслабленому стані. Після завершення вони мали заповнити анкету.

Дані щодо вікового розподілу учасників представлено у табл. 2.

Таблиця 2

Віковий розподіл учасників

Віковий діапазон	Кількість опитаних	Відсоток
18–25	10	33
25–40	10	33
40–50	8	30
більше 50	2	4
Всього	30	100

Більшість учасників відмітили певний позитивний вплив скорегованої музики, що виражалось у підвищенні настрою, зменшенні рівня стресу та покращенні загального самопочуття. Однак частина з них не відчула жодних змін, що може бути пов'язано з індивідуальними особливостями сприйняття музичних стимулів. Інша частина учасників відмітила зміни як негативні. Дані про відчуття та їх розподіл серед учасників представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Суб'єктивна оцінка впливу аудіовізуальної корекції

Оцінка змін	Кількість учасників	Відсоток
Позитивна	17	57
Негативна	3	10
Нейтральна	10	33
Всього	30	100

З отриманих результатів можна зробити висновок, що в цілому взаємодія виявилася вдалою, і алгоритми корекції мозкових хвиль, засновані на математичному апараті обробки сигналів, працюють чітко та коректно.

Висновки

Аудіовізуальна стимуляція мозку на сьогоднішній день є перспективним напрямком в сфері медицини. Вона відкриває нові можливості для поліпшення психічного та фізичного здоров'я людини, а також діагностики та лікування різних порушень.

Було розглянуто біологічні ритми людини, які можуть бути використані для створення персоналізованих стимулів, та методи цифрової обробки отриманих сигналів. Розглянуті наявні дослідження дозволяють підтвердити важливість біоелектричної активності людини та підходів до її обробки у виконанні АВС для лікування різноманітних захворювань у дорослих та дітей.

Розроблене програмне забезпечення відображає характеристики сигналу енцефалограми та транслює енцефалограму у звуковий файл одночасно з виведенням світлового сигналу. В процесі отримання хвиль мозкової активності було застосовано вейвлет-перетворення та режекторні фільтри Баттерворта. Крім того, додатково було розроблене апаратне забезпечення у вигляді керованого з основної програми мікроконтролера для виведення світлового сигналу.

Отримані результати при подальших дослідженнях можуть бути використані для розробки перспективних методів персоналізованого впливу АВС для своєчасного усунення функціональних розладів та відновлення оптимального стану організму. Вони можуть бути корисними для медичних практиків, дослідників та пацієнтів, що шукають ефективні підходи до аудіовізуальної стимуляції мозку.

Список літератури:

- [1] *Дубровін, В. І.* Аудіовізуальна стимуляція головного мозку [Текст] / В. І. Дубровін, К. О. Роговська // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення : І всеукраїнська наук.–техн. конф., м. Житомир, 17–18 травня 2015 р.: зб. тез. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – С. 125–126.
- [2] *Твердохліб, Ю. В.* Биоакустическая коррекция психоэмоционального состояния человека [Текст] / А. В. Рашавченко, Ю. В. Твердохліб, В. І. Дубровін // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: VII міжнар. наук.–практ. конф., 17–19 вересня 2014 р., м. Запоріжжя : зб. тез. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С. 220–221.
- [3] *Твердохліб, Ю. В.* Корекція роботи центральної нервової системи за допомогою біоакустичної терапії [Текст] / М. М. Захарова, А. В. Рашавченко, Ю. В. Твердохліб // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення : І всеукраїнська наук.–техн. конф., м. Житомир, 17–18 травня 2015 р.: зб. тез. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – С. 109–110.
- [4] *Rayi, A.* Electroencephalogram [Text] / A. Rayi, N. I. Murr. – Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing, 2022.
- [5] Дослідження сукупного впливу стресового фактору та музичного сигналу на психофізичний стан людини [Текст] / [А. В. Паренюк, Д. В. Паренюк, К. С. Дрозденко та ін.] // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 71–79.
- [6] *Купін, А. І.* Інтелектуальна система контролю уважності оператора на основі енцефалографа [Текст] / А. І. Купін, О. В. Градовий // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки – 2021. – Т. 32 (71), № 2. – С. 149–157.
- [7] *Sattar, Y.* Electrocardiogram [Text] / Y. Sattar, L. Chhabra. – Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing, 2023.
- [8] Електрокардіографія: клінічні можливості і досягнення в історичному аспекті : (огляд) [Текст] / [В. К. Ташук, О. С. Полянська, П. Р. Іванчук та ін.] // Клініч. анатомія та операт. хірургія. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 123–134.
- [9] *Конончук, Г. Л.* Вступ до Фур'є-оптики : навч. посіб. [Текст] / Г. Л. Конончук, В. М. Прокопеч, В. В. Стукаленко. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2009. – 320 с.
- [10] *Куракіна, Т. В.* Метод аналізу ЕКГ-сигналу на основі безперервного вейвлет-перетворення [Текст] / Т. В. Куракіна, Ю. В. Твердохліб // Сучасні інформаційні системи і технології. – 2013. – № 1. – С. 139–140.
- [11] *Дубровін, В. І.* Програмна реалізація методів спектрального аналізу нестационарних сигналів [Текст] / К. О. Роговська, Ю. В. Твердохліб, В. І. Дубровін // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: VII міжнар. наук.–практ. конф., 17–19 вересня 2014 р., м. Запоріжжя : зб. тез. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С. 65–66.
- [12] Effects of Audio–Visual Stimulation Automatically Controlled by the Bioelectric Potentials from Human Brain and Heart [Text] / [A. I. Fedotchev, S. B. Parin, S. A. Polevaya et al.] // Hum. Physiol. – 2019. – Vol. 45, № 5. – P. 523–526.
- [13] Effect of Audiovisual Stimulation on the Psychophysiological Functions in Track-and-Field Athletes [Text] / [M. S. Golovin, N. V. Balioz, R. I. Aizman et al.] // Hum. Physiol. – 2015. – Vol. 41, № 5. – P. 532–538.
- [14] Integration of Functional, Psychophysiological, and Biochemical Processes in Athletes after Audiovisual Stimulation [Text] / [M. S. Golovin, N. V. Balioz, S. G. Krivoschekov et al.] // Hum. Physiol. – 2018. – Vol. 44, № 1. – P. 54–59.
- [15] Effects of Polymodal Rhythmic Sensory Influences on the Human CNS State and Autonomic Functions [Text] / [O. S. Glazachev, S. Ya. Klassina, O. V. Bobyleva et al.] // Hum. Physiol. – 2010. – Vol. 36, № 2. – P. 172–178.
- [16] Open-Loop Neurofeedback Audiovisual Stimulation: A Pilot Study of Its Potential for Sleep Induction in Older Adults [Text] / [H. Y. Tang, M. V. Vitiello, M. Perlis et al.] // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. – 2015. – Vol. 40, № 3. – P. 183–188.
- [17] Open-Loop Audio-Visual Stimulation (AVS): A Useful Tool for Management of Insomnia? [Text] / [H. Y. Tang, B. Riegel, S. M. McCurry et al.] // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. – 2016. – Vol. 41, № 1. – P. 39–46.
- [18] Closed-loop brain training: the science of neurofeedback [Text] / [R. Sitaram, T. Ros, L. Stoeckel et al.] // Nat. Rev. Neurosci. – 2017. – Vol. 18, № 2. – P. 86–100.
- [19] Clinical, hemispheric, and autonomic changes associated with use of closed-loop, allostatic neurotechnology by a case series of individuals with self-reported symptoms of post-traumatic stress [Text] / [C. H. Tegeler, J. F. Cook, C. L. Tegeler et al.] // BMC Psychiatry. – 2017. – Vol. 17, № 1 : 141.
- [20] Editorial: Closed-Loop Systems for Next-Generation Neuroprostheses [Text] / [T. Levi, P. Bonifazi, P. Massobrio et al.] // Front. Neurosci. – 2018. – Vol. 12 : 26.
- [21] *Alwashmi, K.* Audio-visual stimulation for visual compensatory functions in stroke survivors with visual field defect: a systematic review [Text] / K. Alwashmi, G. Meyer, F. J. Rowe // Neurol Sci. – 2022. – Vol. 43, № 4. – P. 2299–2321.
- [22] Cognitive training in an everyday-like virtual reality enhances visual-spatial memory capacities in stroke survivors with visual field defects [Text] / [L. B. Dehn, M. Piefke, M. Toepper et al.] // Top Stroke Rehabil. – 2020. – Vol. 27, № 6. – P. 442–452.
- [23] *Tinelli, F.* Audio-visual stimulation improves visual search abilities in hemianopia due to childhood acquired brain lesions [Text] / F. Tinelli, G. Purpura, G. Cioni // Multisens Res. – 2015. – Vol. 28, № 1–2. – P. 153–171.