

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Комп'ютерна система симуляції зору

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи КІУКІ-21-3

Айдар ЯНАКАЄВ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність

123 «Комп'ютерна інженерія»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Комп'ютерна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник: ст. викл. Ольга ЄРОШЕНКО

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ЕОМ

(підпис)

Андрій КОВАЛЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Комп'ютерна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Янакаєву Айдару Анверовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Комп'ютерна система симуляції зору _____

затверджена наказом по університету від “ 26 ” травня 2025 р. № 424 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 16 червня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи _____

1. Завдання _____

2. Перелік вимог до проєктованої системи _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1. Аналіз предметної області _____

2. Розробка алгоритмів _____

3. Створення комп'ютерної системи _____

4. Тестування системи _____

5. Оцінка результатів _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій _____

Презентація – 14 слайдів _____

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	26.05.2025	
2	Аналіз існуючих методів вирішення задачі	27.05.2025	
3	Вивчення теоретичних основ	29.05.2025	
4	Розробка алгоритму	31.05.2025	
5	Вибір програмних засобів	31.05.2025	
6	Написання програмного коду	07.06.2025	
7	Реалізація поставленої задачі	07.06.2025	
8	Аналіз отриманих результатів	08.06.2025	
9	Оптимізація процесів додатку	15.06.2025	
10	Оформлення пояснювальної записки	16.06.2025	

Дата видачі завдання “ 26 ” травня 2025 р.

Здобувач _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

ст.викл. Ольга ЄРОШЕНКО _____

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 86 с., 36 рис., 1 табл., 16 джерел.

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА, СИМУЛЯЦІЯ ЗОРУ, МОДЕЛЮВАННЯ ФОСФЕНІВ, ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ, ОБРОБКА ВІДЕО, ГРАФІЧНИЙ ІНТЕРФЕЙС КОРИСТУВАЧА, PYTHON, OPENCV, PYQT6

Метою кваліфікаційної роботи є розробка комп'ютерної системи симуляції зору, що імітує зорове сприйняття незрячих осіб шляхом генерації абстрактних візуальних образів на основі фосфенів.

У процесі виконання роботи було створено повнофункціональний алгоритм обробки даних та візуалізації результатів. Система підтримує роботу зі статичними зображеннями та відео в реальному часі, що робить її універсальним інструментом для моделювання зорового сприйняття. Передбачено інтерактивне налаштування параметрів через графічний інтерфейс користувача, що дозволяє адаптувати обробку під різні сценарії використання та забезпечує гнучкий контроль над якістю отриманого зображення.

Особливістю підходу є орієнтація на біологічну правдоподібність: при проектуванні враховано ключові принципи фосфенного зору, що дозволило досягти наближеності до реального сприйняття. Крім того, реалізовано гнучку систему параметрів, яка дає змогу моделювати різні ступені ураження зору та апаратні обмеження імплантованих пристроїв.

Програмне забезпечення реалізоване мовою програмування Python із використанням бібліотек OpenCV, NumPy та PyQt6. В якості середовища розробки обрано IDE PyCharm від компанії JetBrains.

ABSTRACT

Bachelor's thesis: 86 pages, 36 figures, 1 table, 16 sources.

COMPUTER SYSTEM, VISION SIMULATION, PHOSPHENE MODELING, IMAGE PROCESSING, VIDEO PROCESSING, GRAPHICAL USER INTERFACE, PYTHON, OPENCV, PYQT6

The major goal of this thesis is to develop a computer system for vision simulation that imitates visual perception in blind individuals by generating abstract visual representations based on phosphenes.

In order to achieve this, a fully functional algorithm for data processing and results visualization was designed. The system supports both static images and real-time video input, which makes it a versatile tool for modeling visual perception. An interactive graphical user interface allows flexible adjustment of processing parameters, enabling adaptation to various usage scenarios and providing fine control over the quality of the generated image.

The distinctive feature of the approach is its focus on biological plausibility: the algorithm incorporates key principles of phosphene vision to approximate real perceptual experience. Additionally, the system offers flexible parameter tuning to simulate various degrees of visual impairment and hardware limitations of implanted devices.

The software is written in the Python programming language using OpenCV, NumPy, and PyQt6 libraries. Development was carried out in the PyCharm IDE by JetBrains.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	8
ВСТУП	9
1 ПРОБЛЕМАТИКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЗОРУ	10
1.1 Значення зору у сприйнятті навколишнього світу	10
1.2 Проблематика втрати зору	12
1.3 Основні стратегії заміщення	15
1.3.1 Тактильні технології	16
1.3.2 Аудіоорієнтація	20
1.3.3 Протезування та біоелектроніка	23
1.3.4 Перспективи розвитку	29
2 ФІЗІОЛОГІЧНІ МЕХАНІЗМИ ЗОРОВОГО СПРИЙНЯТТЯ.....	31
2.1 Анатомічна організація зорової системи	31
2.2 Кодування та передача сигналу	33
2.3 Зорова кора головного мозку	35
2.4 Феномен фосфенів як зоровий ефект.....	37
2.5 Нейропластичність	41
3 МАТЕМАТИЧНЕ ПОДАННЯ АЛГОРИТМУ	43
3.1 Опис алгоритму	43
3.2 Математичне представлення.....	46
3.2.1 Просторове кодування зображень у візуальній системі	46
3.2.2 Ретинотопічна організація та картографування зорової кори.....	48
3.2.3 Моделювання перцептивного образу	50
3.2.4 Формалізація та оцінка якості.....	52
4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ.....	53
4.1 Структура додатку	54
4.1.1 Головний модуль.....	56
4.1.2 Функціональний модуль.....	63

4.1.3 Модуль графічного інтерфейсу користувача	69
4.1.4 Демонстрація результатів.....	74
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	78
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	80

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

КС – комп'ютерна система

BCI – інтерфейс мозок–комп'ютер (англ., Brain–Computer Interface)

CLI – інтерфейс командного рядка (англ., Command Line Interface)

CV – комп'ютерний зір (англ., Computer Vision)

FPS – частота кадрів (англ., Frames Per Second)

GUI – графічний інтерфейс користувача (англ., Graphical User Interface)

IDE – інтегроване середовище розробки (англ., Integrated Development Environment)

RGB/BGR – колірна модель, що описує колір через компоненти червоного, зеленого та синього (англ., Red, Green, Blue / Blue, Green, Red)

UI – користувацький інтерфейс (англ., User Interface)

UX – досвід користувача (англ., User Experience)

ВСТУП

Зір є провідним сенсорним каналом, через який людина отримує більшість інформації про навколишній світ. Безсумнівно, його втрата суттєво погіршує якість життя, ускладнюючи орієнтацію в просторі, комунікацію та виконання щоденних завдань.

У відповідь на цю проблему сучасна медицина та біоінженерія розробляють рішення для часткового відновлення або компенсації втрачених зорових функцій. Ключову роль у цьому процесі відіграє нейропластичність – здатність мозку адаптуватися до змін, зокрема шляхом перепрофілювання зорової кори для обробки сигналів з альтернативних сенсорних джерел, таких як дотик або слух. Це явище стало основою для створення технологій сенсорної субституції, що дозволяють незрячим особам сприймати візуальну інформацію у трансформованому вигляді.

Сучасні засоби компенсації зору охоплюють широкий спектр підходів, що умовно поділяються на:

- неінвазивні (тактильні дисплеї, аудіосистеми);
- інвазивні (імпланти, нейроінтерфейси).

Попри значний прогрес, ці технології досі мають низку обмежень, серед яких – невисока роздільна здатність зображення, висока вартість, складність індивідуального налаштування та необхідність тривалого періоду адаптації користувачів.

Метою даної роботи є створення програмного інструменту для моделювання процесу зорової стимуляції, що базується на принципах функціонування кортикальних імплантів. Запропонована програма може бути корисною для візуалізації результатів стимуляції, дослідження ефективності різних параметрів та підготовки до персоналізованого налаштування імплантованих систем.

1 ПРОБЛЕМАТИКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЗОРУ

Зір, як провідний сенсорний канал, відіграє фундаментальну роль у формуванні людського досвіду, впливаючи на численні аспекти життя. Тому втрата можливості бачити становить значну глобальну проблему, що впливає на якість життя мільйонів людей і вимагає комплексного підходу до реабілітації та технологічної підтримки.

1.1 Значення зору у сприйнятті навколишнього світу

Як вже було зазначено, зорове сприйняття є домінуючим сенсорним каналом, через який людина отримує основну частку інформації про навколишній світ.

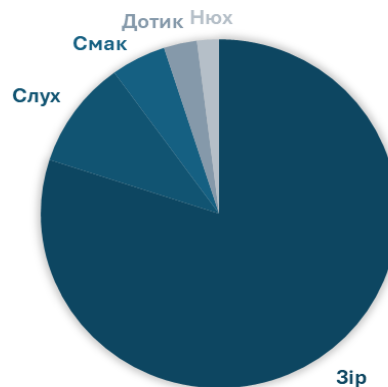


Рисунок 1.1 – Схематичне порівняння кількості вхідної інформації залежно від сенсорної системи людини

За оцінками досліджень у галузі біомедичної інженерії, від 80% до 90% зовнішніх сигналів, що обробляються мозком, мають візуальну природу [1]. Ця статистика підкреслює унікальну роль зору у формуванні сприйняття реальності, забезпеченні орієнтації в просторі та взаємодії з об'єктами.

Зір є ключовою сенсорною функцією, що забезпечує не лише розпізнавання форм, кольорів і відстаней, але й інтерпретацію складних візуальних сцен, необхідних для прийняття рішень у повсякденному житті. Обробка візуальної інформації залучає значну частину кори головного мозку – від 30% до 55% [1] – що значно перевищує ресурси, виділені на слух чи дотик (рисунок 1.1). Ця нейронна спеціалізація підкреслює еволюційну важливість зору для виживання та адаптації людини.

Процес зорового сприйняття охоплює кілька етапів: від уловлювання світла фоторецепторами сітківки до складної обробки в зоровій корі, де відбувається аналіз об'єктів, руху та просторових характеристик. Така багатоступенева система забезпечує високу точність і швидкість сприйняття, недосяжну для інших сенсорних каналів.

Окрім цього, зір відіграє фундаментальну роль у когнітивному, емоційному та соціальному розвитку, особливо в дитячому віці. Візуальні стимули сприяють формуванню пам'яті, уваги, мовлення й абстрактного мислення. Дослідження вказують, що втрата зору в ранньому віці може спричинити затримки в розвитку мовних і когнітивних навичок, а також ускладнити соціальну взаємодію через обмеження невербальних сигналів, таких як міміка чи жести. У дорослих зір впливає на професійну діяльність, незалежність і психоемоційний стан, що підкреслює його значення для повноцінного функціонування в суспільстві.

Таким чином, зір є не лише основним джерелом інформації про навколишній світ, але й незамінним елементом для розвитку когнітивних, соціальних і емоційних функцій, забезпечуючи комплексну адаптацію людини до середовища.

1.2 Проблематика втрати зору

Втрата зору становить одну з найсерйозніших глобальних проблем охорони здоров'я, впливаючи на якість життя мільйонів людей і створюючи значне соціально-економічне навантаження.

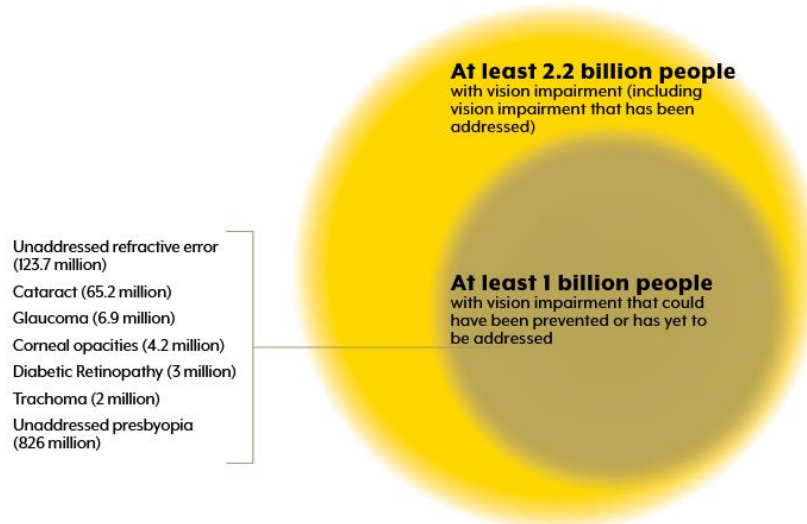


Рисунок 1.2 – Статистика ВООЗ

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), у світі налічується приблизно 2,2 мільярда осіб із порушеннями зору, з яких щонайменше 1 мільярд випадків можна було б запобігти або вилікувати за допомогою своєчасного втручання [2]. З них 36–39 мільйонів людей є сліпими (0,56% світового населення), а 246 мільйонів мають слабкозорість (3,5%), що вказує на співвідношення сліпих до слабкозорих як 1:6. В Україні, за оцінками, зареєстровано близько 1,5 мільйона випадків захворювань очей, зокрема понад 300 тисяч серед дітей.

Порушення зору мають значний вплив на повсякденне життя, обмежуючи здатність до пересування, читання, професійної діяльності та соціальної взаємодії загалом. Особливо гостро ця проблема відчувається в країнах із низьким і середнім рівнем доходу, де 90% осіб із порушеннями

зору стикаються з обмеженим доступом до медичних послуг [2-3]. Втрата зору також асоціюється з підвищеним ризиком депресії, соціальної ізоляції та економічної залежності, що підкреслює необхідність комплексних реабілітаційних і технологічних рішень.

Основні причини порушень зору включають як виліковні, так і невиліковні стани, що варіюються залежно від регіону, віку та соціально-економічних умов.

Найпоширенішими причинами глобальних порушень зору є:

- некориговані порушення рефракції (43%);
- катаракта (33%);
- глаукома (2%).

Некориговані рефракційні помилки, такі як короткозорість, далекозорість, пресбіопія та астигматизм, залишаються провідною причиною через обмежений доступ до окулярів або хірургічної корекції, особливо в країнах, що розвиваються [2].

Катаракта є найчастішою причиною сліпоти (47,8%), спричиненою помутнінням кришталіка, і її поширеність зростає на 25% за останнє десятиліття, з прогнозом до 35 мільйонів сліпих через катаракту станом на 2019 рік [2].

Глаукома, що характеризується підвищеним внутрішньоочним тиском і пошкодженням зорового нерва, є основною причиною незворотної сліпоти, відповідаючи за 33% випадків серед осіб похилого віку.

Вікова дегенерація макули (19%) і діабетична ретинопатія (13%) також є значними причинами, особливо в країнах із високою поширеністю цукрового діабету. Така хвороба, як трахома, становить 15% випадків сліпоти, переважно в регіонах із низьким рівнем санітарії, хоча її поширеність зменшилася завдяки профілактичним заходам. Інші причини включають травми ока, пігментний ретиніт, дитячу сліпоту, спричинену інфекціями (наприклад, кір під час вагітності), та неврологічні порушення, що впливають на кору головного мозку.



Рисунок 1.3 – Одна з причин порушень зору

В Україні проблема збереження офтальмологічного здоров'я набуває особливої актуальності, адже порушення зору діагностують майже у кожного третього мешканця [3]. Зростання порушень зору пов'язане з судинними захворюваннями, діабетом і короткозорістю, що відображає вплив сучасного способу життя, зокрема тривалого використання гаджетів. Комп'ютерний зоровий синдром і синдром сухого ока також стають дедалі поширенішими через надмірне зорове навантаження.

За даними ВООЗ, 80% випадків порушень зору можна попередити або вилікувати, що вказує на значний потенціал профілактичних і терапевтичних заходів. Однак пізня діагностика, недостатня інформованість населення та обмежена доступність технологій залишаються ключовими бар'єрами.

Віковий фактор відіграє значну роль у поширеності порушень зору: 65% слабкозорих і 82% сліпих – це люди віком старше 50 років, хоча ця група становить лише 20% світового населення [2-3]. Діти також є вразливою групою, оскільки втрата зору в ранньому віці може призвести до затримок у когнітивному та соціальному розвитку.

Отже, причини порушень зору є багатогранними, поєднуючи генетичні, вікові, інфекційні та соціально-економічні фактори. Ефективна боротьба з цією проблемою вимагає комплексного підходу, що включає профілактику, ранню діагностику та впровадження інноваційних технологій.

1.3 Основні стратегії заміщення

Стратегії заміщення зорових функцій базуються на принципі сенсорної субституції (від лат. *substitutio* – «заміщення, заміна»), що передбачає передачу візуальної інформації через альтернативні сенсорні канали, серед яких можна виділити:

- тактильний;
- аудіальний;
- комбінований;
- безпосередньо нейронний.

Підхід ґрунтується на фундаментальній властивості людського мозку – нейронній пластичності, що дозволяє перерозподіляти функції між сенсорними системами. Дослідження нейрофізіології демонструють, що у незрячих осіб, які використовують пристрої заміщення зору, активуються ділянки зорової кори, аналогічні тим, що задіяні у зрячих під час обробки візуальних стимулів [4]. Це свідчить про те, що зорова кора не є виключно залежною від ретинальних сигналів, а здатна адаптуватися до інтерпретації даних, отриманих через інші сенсорні модальності, за умови відповідного навчання та тренування.

Такі стратегії не прагнуть повного відтворення зору в його природній формі, а радше пропонують альтернативні способи кодування та інтерпретації візуальної інформації. Їх завдання полягає у створенні функціонального еквівалента зору, що зміг би дозволити незрячим особам орієнтуватися в просторі, розпізнавати форми та об'єкти, а також взаємодіяти з навколишнім середовищем у повсякденному житті.

Однак ефективність таких підходів залежить не лише від технічної реалізації пристроїв, а й від здатності користувача до нейропсихологічної адаптації, що потребує часу, тренування та індивідуального налаштування.

1.3.1 Тактильні технології

Тактильні технології заміщення зору використовують шкіру як основний канал для передачі візуальної інформації, перетворюючи оптичні дані на тактильні стимули, зокрема вібрацію, тиск або електричні імпульси. Цей підхід ґрунтується на високій чутливості тактильної системи людини та її здатності адаптуватися до нових сенсорних сигналів. Такі технології охоплюють як традиційні методи, так і сучасні інноваційні рішення, що застосовують складні інтерфейси для передачі просторових і об'єктних характеристик.



Рисунок 1.4 – Приклад читання книги, написаної шрифтом Брайля

Одним із найпоширеніших і стандартизованих методів тактильної компенсації зору залишається Шрифт Брайля. Для незрячих осіб він забезпечує доступ до текстової інформації. Ця система трансформує письмові символи в комбінації рельєфних крапок, які сприймаються дотиком, переважно кінчиками пальців.

Завдяки універсальності шрифт Брайля використовується в книгах, інформаційних табличках, клавіатурах і дисплеях. Простота, доступність і широке поширення роблять його незамінним у повсякденному житті незрячих осіб.

Попри ефективність у передачі тексту, шрифт Брайля має обмеження щодо відтворення нетекстової інформації, як-от просторових об'єктів чи графічних зображень. Це зумовило розвиток досконаліших тактильних технологій, що значно розширюють можливості незрячих осіб, дозволяючи сприймати не лише текст, а й графічну інформацію.

Тому рельєфні носії відіграють важливу роль у формуванні просторових уявлень про навколишнє середовище. Вони використовують тактильну чутливість для передачі двовимірних даних, таких як геометричні форми, мапи, схеми чи абстрактні діаграми, сприяючи формуванню ментальних уявлень про об'єкти та оточення.

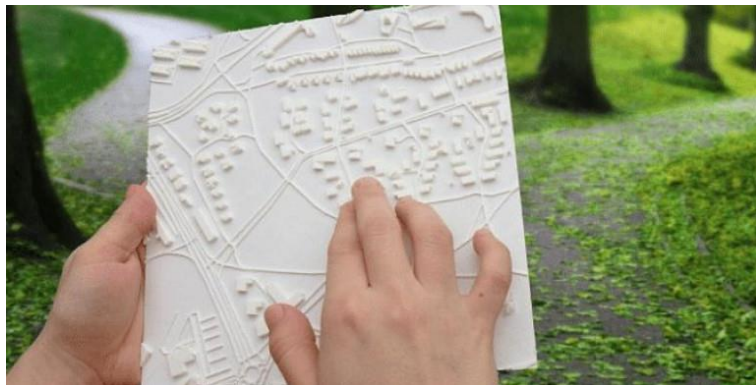


Рисунок 1.5 – Приклад тактильної мапи

До прикладу, рельєфні мапи міст або транспортних мереж допомагають створювати ментальні моделі місцевості, що є критично важливим для навігації. Виготовлені з матеріалів із різною текстурою та висотою рельєфу, ці носії кодують інформацію про відстані, орієнтири чи типи об'єктів.

На відміну від динамічних дисплеїв, рельєфні носії є статичними, але їхня простота й доступність забезпечують широке застосування в освіті та громадських просторах, сприяючи розвитку просторової уяви та когнітивного картографування.



Рисунок 1.6 – Приклад використання планшету Dot Pad

Прикладом більш передового рішення є Dot Pad – пристрій, що використовує масив рухомих пінових елементів для створення динамічних рельєфних зображень. Кожен пін може підніматися або опускатися, формуючи тактильні патерни, що відображають контури об'єктів, графічні схеми чи текстові символи. Це дозволяє незрячим користувачам сприймати візуальну інформацію в реальному часі, наприклад, під час роботи з мапами чи діаграмами. Інтеграція Dot Pad із комп'ютерними системами та мобільними додатками забезпечує швидке оновлення даних, що робить його придатним для навчальних і професійних середовищ. Такі пристрої відкривають нові можливості для доступу до графічного контенту, раніше недоступного для незрячих осіб.

Таким чином, рельєфні носії залишаються незамінними для статичного представлення даних в контексті орієнтації в просторі. А сучасні тактильні дисплеї забезпечують динамічне оновлення інформації, що робить їх універсальним інструментом для освіти, роботи та навігації. Проте висока вартість передових пристроїв і обмежена роздільна здатність, зумовлена як фізичними характеристиками технологій, так і чутливістю шкіри, ускладнюють передачу дрібних деталей і знижують доступність цих технологій для широкого кола користувачів.

Однак цікаво, що тактильні технології не покладаються тільки на чутливість шкіри, а пропонують більш несподівані варіанти. До цього відносяться тактильні відеоінтерфейси (Tactile Display Units, TDU), що використовують електротактильну стимуляцію.



Рисунок 1.7 – Схематичне пояснення роботи BrainPort V100

У якості прикладу можна привести систему BrainPort, яка конвертує зображення з цифрової камери в матрицю слабких електричних імпульсів, що передаються на язик через електродний масив. Тут язик обрано через його високу щільність нервових закінчень і здатність до тонкої диференціації стимулів, що забезпечує високу роздільну здатність сприйняття. Адаптація до BrainPort демонструє нейропластичність мозку: після тренувань (від кількох тижнів до місяців) користувачі вчаться інтерпретувати електричні патерни як просторові об'єкти чи навігаційні маркери.

Однак використання таких систем вимагає значних когнітивних зусиль і тривалого навчання, що може обмежувати їхню доступність. Попри це, тактильні відеоінтерфейси є перспективним напрямком, поєднуючи високу точність передачі інформації з неінвазивним підходом.

1.3.2 Аудіоорієнтація

Аудіальна орієнтація є ефективним методом заміщення зору, що трансформує візуальну інформацію в звукові сигнали, використовуючи слух як основний канал сприйняття.

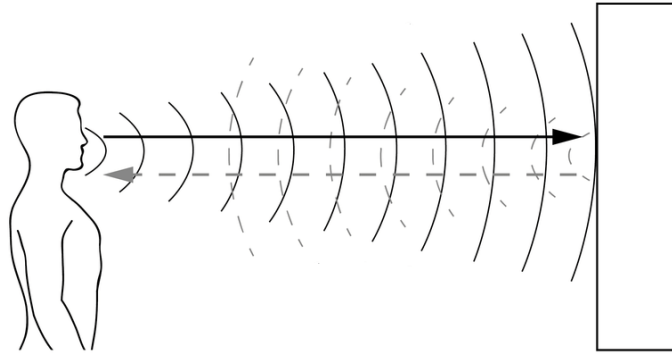


Рисунок 1.8 – Принцип роботи ехолокації

Ехолокація становить унікальний природний метод аудіоорієнтації, що деякі незрячі особи опановують самостійно. Створюючи акустичні сигнали, наприклад, клацання язиком або постукування, користувачі аналізують відлуння, що відбивається від об'єктів, оцінюючи їхню відстань, розмір, форму, а в окремих випадках навіть матеріал.

Варто зазначити, що нейрофізіологічні дослідження демонструють: досвідчені практики ехолокації активують зорову кору мозку подібно до зрячих осіб під час зорового сприйняття [4]. Такий ефект добре підкреслює нейронну пластичність нашого мозку. Цей метод не потребує спеціалізованих пристроїв і є доступним для самостійного освоєння, але його ефективність обмежена складністю інтерпретації акустичних сигналів і вимагає тривалого навчання. Ехолокація особливо цінна для навігації та виявлення перешкод, однак менш придатна для розпізнавання складних об'єктів чи текстової інформації.

Переходячи до технологічних рішень, навігаційні аудіальні помічники значно розширюють можливості орієнтації в просторі. Ці спеціалізовані пристрої або програмні рішення інтегруються з GPS, ультразвуковими сенсорами чи камерами для збору даних про навколишнє середовище, конвертуючи їх у голосові підказки або бінауральні звуки.



Рисунок 1.9 – Браслет Sunu Band

Наприклад, пристрій Sunu Band використовує ультразвукові датчики для виявлення перешкод, передаючи інформацію через вібрацію або звукові сигнали, що допомагає уникати зіткнень.

У міських умовах аудіонавігаційні додатки, такі як Microsoft Soundscape, створюють тривимірні звукові ландшафти, дозволяючи локалізувати орієнтири, як-от зупинки чи перехрестя, за допомогою бінаурального звуку. Перевагою цих систем є простота використання та здатність працювати в реальному часі, хоча їхня ефективність може знижуватися в шумних середовищах і залежить від точності сенсорів та якості програмного забезпечення.

Наступним етапом розвитку аудіоорієнтації є системи соніфікації, які перетворюють візуальні дані на звукові патерни, дозволяючи незрячим особам «чути» зображення або просторові сцени.



Рисунок 1.10 – Обладнання The vOICe

Одним із найвідоміших прикладів є пристрій The vOICe (visual Organization Information Converted to electroacoustics), що конвертує зображення, отримане з камери, у звукові ландшафти. Система складається з:

- відеокамери, зазвичай вмонтованої в окуляри;
- мікрокомп'ютера або мобільного пристрою для обробки зображення;
- навушників, через які користувач чує згенеровані аудіосигнали.

У цій системі горизонтальна вісь зображення відображається через тривалість звуку (сканування зліва направо), вертикальна – через частоту (чим вище об'єкт, тим вища частота), а яскравість – через гучність (світлі ділянки звучать голосніше). Такий аудіовізуальний переклад дозволяє користувачеві сприймати обриси об'єктів та їхнє просторове розташування.

Освоєння систем соніфікації вимагає значних когнітивних зусиль і тривалого тренування, оскільки інтерпретація звукових патернів є неприродним процесом для людського мозку. Проте ці системи відкривають унікальні можливості для сприйняття складної візуальної інформації.

Аудіоорієнтація охоплює спектр від природних методів, таких як ехолокація, до високотехнологічних рішень, як навігаційні помічники та системи соніфікації. Кожен із цих підходів має свої недоліки та обмеження, але вони все одно значно підвищують автономність і якість життя незрячих осіб, забезпечуючи доступ до інформації та просторової орієнтації.

1.3.3 Протезування та біоелектроніка

Біоінженерія – це багатогранна галузь, яка використовує принципи інженерії та біології для вирішення проблем у сфері охорони здоров'я, довкілля та промислових технологій. Одним з ключових напрямків у межах цієї дисципліни є біомедична інженерія, що охоплює розробку та впровадження медичних пристроїв.

Окрему нішу в цій сфері займають технології протезування зору, які належать до найбільш інноваційних рішень, спрямованих на відновлення зорових функцій у пацієнтів із повною або частковою втратою зору. Важливо, що вони дають змогу покращити сприйняття навколишнього світу навіть за значних порушень зорової системи.

Залежно від цільового рівня взаємодії з нервовою системою, зорові імпланти класифікуються на:

- оптичні;
- ретинальні;
- кортикальні.

Ці технології ґрунтуються на імплантації біоелектронних пристроїв, які можуть стимулювати різні рівні зорової системи – від оптичних структур ока та рецепторів сітківки до нейронів зорової кори головного мозку, забезпечуючи комплексний підхід до відновлення або компенсації зорових функцій.

Поєднуючи досягнення нейронаук, електроніки та біоінженерії, такі системи дають змогу або частково відтворювати природні процеси зорового сприйняття, або створювати штучні візуальні відчуття, обминаючи пошкоджені анатомічні шляхи. Принцип їхньої роботи полягає у фіксації візуальної інформації за допомогою зовнішніх сенсорів (наприклад, камер), її обробці спеціалізованими алгоритмами комп'ютерного зору та передачі електричних сигналів до нервової тканини через мініатюрні електродні масиви, імплантовані в цільову ділянку.

Оптичні імпланти – це медичні пристрої, призначені для відновлення або покращення природної оптичної передачі зображення до сітківки, без безпосереднього втручання у нервову систему. Вони орієнтовані на випадки, коли структура зорового аналізатора частково збережена, а передача сигналу до сітківки або далі до мозку не порушена.

Основні типи оптичних імплантів це:

- інтраокулярні лінзи, ІОЛ (імплант кришталика);
- кератопротези (імплант рогівки).

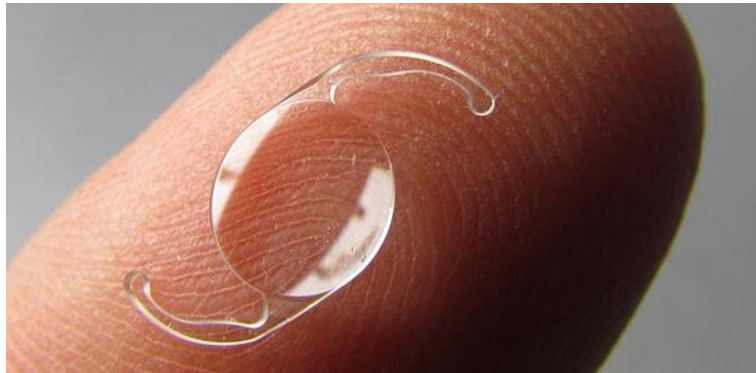


Рисунок 1.11 – Інтраокулярна лінза в порівнянні з пальцем людини

Так, інтраокулярні лінзи використовуються після видалення катаракти, а кератопротези застосовуються для корекції дефектів, спричинених травмами чи кератоконусом. Цікаво, що у деяких випадках застосовують факічні ІОЛ, які можуть бути імплантованими без видалення природного кришталика. Вони забезпечують корекцію сильної короткозорості або далекозорості, коли інші методи неефективні.

Перевагою оптичних імплантів є їхня відносна простота, висока біосумісність і короткий період реабілітації. Проте їх ефективність обмежується випадками, коли збережено цілісність сітківки та зорового нерва, оскільки такі імпланти не створюють штучних зорових сигналів, а оптимізують природне сприйняття. Цей факт робить їх менш інвазивними порівняно з іншими типами імплантів.

Ретинальні імпланти належать до найбільш вивчених та клінічно апробованих технологій зорового протезування. Вони призначені передусім для пацієнтів із дегенеративними захворюваннями сітківки, зокрема пігментним ретинітом та віковою макулярною дегенерацією, при яких збереженими залишаються деякі нейронні елементи внутрішніх шарів сітківки, зокрема гангліозні клітини.

Такі пристрої імплантуються безпосередньо в сітківку ока й працюють шляхом електричної стимуляції збережених нейронів. Отримана активація передається вздовж зорового нерва до вищих зорових центрів мозку, викликаючи відчуття світла або простих образів.



Рисунок 1.12 – Обладнання Argus II

Однією з найвідоміших і найуспішніших комерційних систем є Argus II, розроблена американською компанією Second Sight. У 2013 році цей пристрій став першим ретинальним імплантом, схваленим FDA (Управлінням з контролю за продуктами і ліками США) для широкого клінічного використання.

Система Argus II складається з таких компонентів:

- камери, встановленої на спеціальних окулярах;
- портативного блоку обробки сигналів (відеопроцесора);
- передавача, вмонтованого в дужку окулярів;
- мікрочипа з електродним масивом, імплантованого в сітківку.

Кортикальні імпланти пропонують революційний підхід до компенсації зору, оскільки дозволяють обійти пошкоджені периферичні елементи зорового аналізатора – такі як сітківка чи зоровий нерв – шляхом прямої стимуляції зорової кори головного мозку, зокрема її первинної зони (V1).

Основу таких систем становлять електродні масиви, імплантовані у відповідні ділянки кори, що при активації генерують фосфени. Кожен фосфен відповідає певній топографічній зоні кори, що дає змогу «малювати» прості візуальні патерни шляхом стимуляції конкретних груп нейронів. Хоча отримане візуальне сприйняття є фрагментарним і не відтворює реальних зображень у повному сенсі, воно дозволяє користувачам розпізнавати форму, контури чи розташування об'єктів.



Рисунок 1.13 – Обладнання Orion

Однією з найперспективніших систем такого типу є Orion, розроблена тією ж компанією Second Sight. На відміну від ретинальних імплантів, Orion передає сигнали з відеокамери безпосередньо до кори головного мозку, минаючи усі пошкоджені ділянки зорового тракту.

Система Orion складається з кількох ключових компонентів, а саме з:

- відеокамери, закріпленої на окулярах;
- зовнішнього процесору обробки сигналів;
- передавача, розміщеного за вухом;
- електродного масиву, імплантованого у зорову кору.

Обидва типи імплантів – ретинальні та кортикальні – базуються на єдиному принципі: захопленні зображення за допомогою зовнішньої камери, його обробці спеціалізованими алгоритмами, а потім перетворенні на електричні сигнали, що стимулюють відповідні ділянки зорової системи для формування візуальних відчуттів у вигляді фосфенів. Вони формують просту, переважно чорно-білу та низькороздільну, але функціональну картину оточення. У ретинальних імплантах ці сигнали подаються на сітківку, а у кортикальних – безпосередньо на первинну зорову кору мозку. Потенціал обох технологій значною мірою залежить від подальшого вдосконалення електродних масивів і алгоритмів обробки сигналів.

Порівняння всіх цих систем показує їхню специфічність залежно від стану зорової системи. Оптичні імпланти є оптимальними для осіб із частковою втратою зору, де сітківка та зоровий нерв зберігають функціональність, як у випадках катаракти чи дефектів рогівки. Вони менш інвазивні, але непридатні для повної втрати зору. Ретинальні імпланти підходять для пацієнтів із дегенеративними захворюваннями сітківки, але потребують збереження функціональних нервових шляхів, що обмежує їхнє застосування при пошкодженнях зорового нерва. А ось кортикальні імпланти є універсальними, оскільки можуть використовуватися при будь-яких ушкодженнях зорової системи. Завдяки цьому технологія має потенціал для застосування у пацієнтів з повною втратою зору, спричиненою різними патологіями, включаючи глаукому, травми зорового нерва або навіть аномалії розвитку очей. Проте реалізація таких систем пов'язана зі значними викликами: вони потребують надзвичайно точного хірургічного втручання, підпадають під ризик нейроімунного відторгнення імплантата, а також мають обмежену роздільну здатність, зумовлену складністю адресної стимуляції окремих нейронів у корі.



Рисунок 1.14 – Чип з назвою «Link» від компанії Neuralink

Найінноваційнішим напрямком є інтерфейси «мозок–комп’ютер» (Brain–Computer Interface, BCI), що вдосконалюють можливості кортикальних і, потенційно, ретинальних імплантів. BCI поєднують пряму нейронну стимуляцію з передовими обчислювальними технологіями, забезпечуючи взаємодію між мозком і зовнішніми пристроями, що обробляють візуальну інформацію. Вони включають камеру для захоплення зображень, блок обробки з алгоритмами CV та масив електродів для стимуляції нейронів. На відміну від кортикальних імплантів, які фокусуються на статичній стимуляції, BCI використовують машинне навчання для адаптації сигналів на основі зворотного зв’язку від користувача, що покращує якість сприйняття з часом.

Наприклад, експериментальні системи, такі як розробки Neuralink, досліджують можливість створення високороздільних візуальних образів шляхом точкової стимуляції, що може вдосконалити кортикальні імпланти, підвищивши їхню роздільну здатність і точність.

Проте наразі ці системи стикаються з етичними, технічними та біологічними викликами, зокрема щодо довготривалої біосумісності імплантів і складності обробки великих обсягів даних. Попри це, BCI відкривають перспективи для радикального вдосконалення як кортикальних, так і ретинальних імплантів у майбутньому.

1.3.4 Перспективи розвитку

Сучасні методи компенсації втрати зору спрямовані на забезпечення незрячих осіб можливістю орієнтуватися в просторі, розпізнавати об'єкти та взаємодіяти з навколишнім середовищем. Ці технології, включаючи тактильні, аудіальні, біоелектронні та нейроінтерфейсні підходи, використовують нейронну пластичність мозку для адаптації до альтернативних сенсорних каналів, частково відновлюючи зорові функції. Попри обмеження, такі як тривале навчання, обмежена роздільна здатність чи висока вартість, вони значно підвищують якість життя та відкривають перспективи для інноваційних рішень у реабілітації.

Порівняння різних підходів до компенсації зору підкреслює їхню залежність від ступеня ушкодження зорової системи та індивідуальних потреб користувача. Тому вибір методу визначається клінічною картиною, доступністю технологій і готовністю до адаптації.

Можна запевнитися, що розглянуті методи спираються на міждисциплінарні досягнення в галузях:

- нейронаук (дослідження нейронної пластичності);
- біоінженерії (розробка біосумісних матеріалів та імплантів);
- комп'ютерного зору (обробка зображень);
- штучного інтелекту (оптимізація алгоритмів та адаптація сигналів).

Ключовим напрямом розвитку сучасних технологій компенсації зору є вдосконалення роздільної здатності електродних матриць у ретинальних і кортикальних імплантах. Навіть сучасні системи обмежені низькою щільністю електродів, які забезпечують лише базові, низькороздільні образи. Розробка мікроелектродних масивів із вищою щільністю контактів дозволить значно покращити деталізацію сприйняття об'єктів і текстур, наближаючи штучне зорове сприйняття до природного.

Паралельно важливим аспектом є забезпечення біосумісності. Нанотехнології сприяють кращій інтеграції з нервовою тканиною, забезпечуючи стабільну та довготривалу роботу пристроїв. Для оптичних імплантів біосумісність запобігає ускладненням, таким як помутніння тканин чи інфекції. У ретинальних та кортикальних імплантах, а також в інтерфейсах «мозок-комп'ютер», біосумісні матеріали мінімізують деградацію електродів, значно подовжуючи їхній термін служби.

Штучний інтелект (ШІ) відіграє центральну роль в оптимізації обробки алгоритмів комп'ютерного зору, зокрема у виявленні контурів і сегментації об'єктів. Методи глибокого навчання зменшують когнітивне навантаження, спрощуючи інтерпретацію сигналів, а адаптивні ВСІ аналізують зворотний зв'язок у реальному часі, покращуючи якість сприйняття.

На відміну від традиційних методів, що намагалися відновити біологічну функцію ока, сучасні технології зосереджені на альтернативних каналах сприйняття, використовуючи адаптивність зорової кори. ВСІ вдосконалюють кортикальні та ретинальні імпланти, застосовуючи машинне навчання для підвищення роздільної здатності та адаптивності сигналів.

Таким чином, у майбутньому поєднання високороздільних імплантів, інтелектуальних алгоритмів і персоналізованих інтерфейсів може призвести до створення систем штучного зору, які забезпечать не лише базову функціональність, але й сприйняття, наближене до природного.

Такі перспективи підкреслюють важливість подальших інвестицій у дослідження та розробку. Саме тому виникає потреба в програмному моделюванні, що дозволило б прогнозувати реакцію мозку на конкретні типи стимуляції та оптимізувати спосіб формування візуального представлення [10].

2 ФІЗІОЛОГІЧНІ МЕХАНІЗМИ ЗОРОВОГО СПРИЙНЯТТЯ

Зорове сприйняття є складним фізіологічним процесом, що забезпечує обробку та інтерпретацію візуальної інформації, дозволяючи людині взаємодіяти з навколишнім світом. Цей процес охоплює низку анатомічних структур, нейронних механізмів і когнітивних функцій, які разом формують цілісне уявлення про об'єкти, простір і рух.

2.1 Анатомічна організація зорової системи

Зорова система людини є складною ієрархічною структурою, що включає периферичні та центральні компоненти, що працюють у тісній взаємодії для забезпечення повного циклу зорового сприйняття.

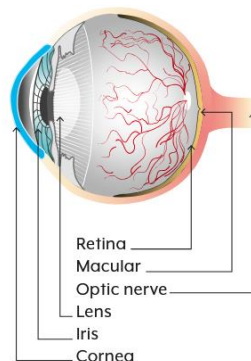


Рисунок 2.1 – Будова ока людини

Первинним органом зору є око. Воно складається з кількох ключових структур (рисунок 2.1), що взаємодіють на різних етапах обробки світла:

- рогівка (cornea) відповідає за первинне заломлення;
- райдужка (iris) регулює кількість потрапляння;
- кришталік (lens) здійснює додаткове фокусування;
- сітківка (retina) перетворює сигнал на нервові імпульси.

Після перетворення світлового сигналу на електричний у сітківці, зоровий нерв (optic nerve) передає імпульси до зорової хіазми (optic chiasm), де відбувається часткове перехрещення нервових волокон (рисунок 2.2). Такий механізм забезпечує інтеграцію інформації з обох очей та формування бінокулярного бачення, необхідного для просторового орієнтування.

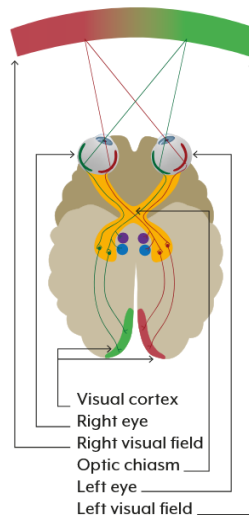


Рисунок 2.2 – Структура зорового аналізатору людини

Далі сигнали прямують до латерального колінчастого тіла (ЛКТ) – підструктури таламуса, що відіграє роль фільтра та первинного центру обробки зорової інформації. У ЛКТ відбувається сортування, посилення та первинна інтеграція сигналів, що дозволяє виділяти найважливішу сенсорну інформацію ще до її потрапляння в кору.

З ЛКТ аксони проєктуються через зорову променистість до первинної зорової кори (V1), розташованої в потиличній частці головного мозку. Тут розпочинається кортикальна обробка візуальних стимулів, де інформація про форму, контраст, напрямок руху та локалізацію об'єктів починає розпізнаватися на більш високому рівні.

У такий спосіб центральна частина зорової системи завершує трансформацію фізичного стимулу у суб'єктивне зорове сприйняття.

2.2 Кодування та передача сигналу

Кодування зорової інформації починається в сітківці – тонкому шарі нервової тканини, що містить п'ять основних типів нейронів (рисунок 2.3), які спільно забезпечують первинну обробку зорової інформації та її передачу до вищих відділів зорової системи:

- фоторецептори (палички та колбочки);
- горизонтальні, біполярні, амакринові та гангліозні клітини.

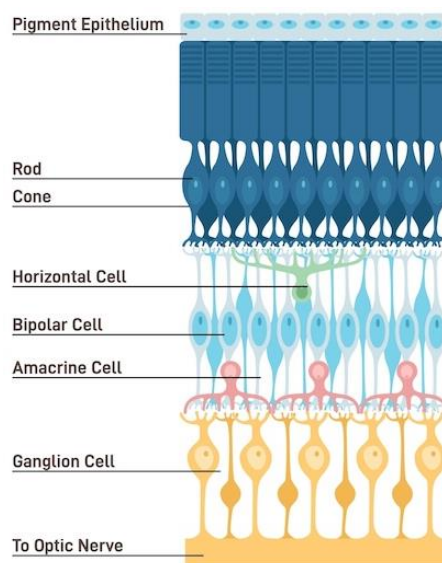


Рисунок 2.3 – Структура сітківки

Палички відповідають за сприйняття в умовах низької освітленості (скотопічний зір), тоді як колбочки забезпечують кольорове бачення та високу просторову роздільну здатність при яскравому денному освітленні (фотопічний зір).

Сигнали, що виникають у фоторецепторах у відповідь на дію світла, проходять проміжну обробку горизонтальними, біполярними та амакриновими клітинами, а потім передаються до гангліозних клітин, аксони яких утворюють зоровий нерв.

Фототрансдукція – процес перетворення світлової енергії на електричні сигнали – починається з поглинання фотонів фоторецепторами. Це спричиняє фотохімічні реакції, що змінюють мембранний потенціал клітини та модулюють вивільнення нейромедіаторів, передаючи інформацію до наступних нейронних ланок.

Кодування кольору в сітківці забезпечується трьома типами колбочок, кожна з яких чутлива до певного діапазону довжин хвиль (рисунок 2.4):

- довгих (червоний);
- середніх (зелений);
- коротких (синій).

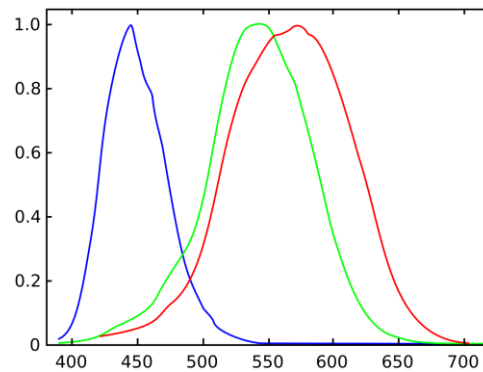


Рисунок 2.4 – Функції спектрального відгуку колбочок

Саме співвідношення активності цих трьох типів колбочок створює основу для сприйняття широкого спектра кольорів за принципом, подібним до моделі RGB, яка використовується в цифрових зображеннях.

Ключовою особливістю організації зорової системи є ретинотопічне представлення: топографічна структура зображення, що проектується на сітківку, зберігається у вигляді просторової мапи на наступних етапах обробки. Це забезпечує точну передачу просторових, контрастних та якісних характеристик візуальної сцени, дозволяючи мозку формувати цілісне, деталізоване і значиме сприйняття навколишнього середовища.

2.3 Зорова кора головного мозку

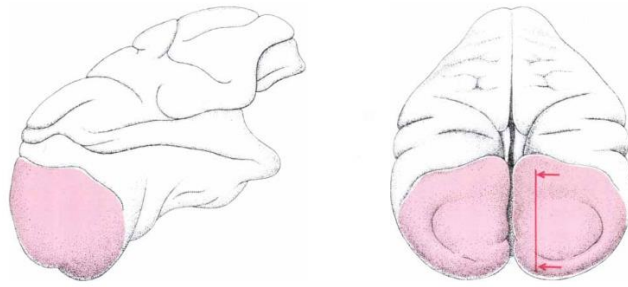


Рисунок 2.5 – Позначення первинної зорової кори в мозку людини

Зорова кора, розташована переважно в потиличній частці головного мозку, є центральним елементом обробки візуальної інформації, забезпечуючи аналіз та інтерпретацію зорових стимулів. Ця складна нейронна структура відіграє ключову роль у формуванні цілісного сприйняття навколишнього світу, дозволяючи людині розпізнавати об'єкти, оцінювати їхнє розташування в просторі та реагувати на динамічні зміни середовища.

Зорова кора функціонує як ієрархічна система, де різні зони спеціалізуються на обробці окремих аспектів зорових даних, від базового аналізу форм до складної семантичної інтерпретації. Завдяки цій організації мозок здатний створювати деталізовані візуальні уявлення, які є основою для когнітивних процесів, таких як пам'ять, увага, прийняття рішень і навчання.

Первинна зорова кора, позначена як V1, є початковою точкою обробки зорової інформації в корі. Розташована в потиличній частці вздовж шпорної борозни, V1 отримує сигнали від латерального колінчастого тіла (ЛКТ) таламуса через зорові волокна. Нейрони V1 мають чітко визначені рецептивні поля, що реагують на специфічні стимули, такі як орієнтація ліній (вертикальні, горизонтальні чи діагональні), просторові частоти та контраст. Ці нейрони виконують базовий аналіз зображення, декомпонуючи його на елементарні складові, такі як контури та текстури.

Інформація з V1 передається до вторинних зорових зон, кожна з яких виконує спеціалізовані функції:

- V2 (аналізує складні контури, кути та криві; бере участь в обробці глибини та стереозору);
- V3 (відповідає за просторову організацію та динамічний аналіз форм);
- V4 (обробляє кольори й текстури, забезпечуючи сприйняття відтінків і поверхонь);
- V5/MT (спеціалізується на аналізі руху: швидкості, напрямку та траєкторії об'єктів).

Вищі асоціативні зони, розташовані в скроневій і тім'яній корі, інтегрують зорові дані з іншими сенсорними модальностями, такими як слух, дотик і пропріоцепція, для створення цілісного сприйняття.

Зорова кора тісно пов'язана з когнітивними процесами. Асоціативні зони скроневої та лобової кори беруть участь у семантичній інтерпретації зорових стимулів, дозволяючи пов'язувати візуальну інформацію з поняттями, пам'яттю та емоціями. Це забезпечує не лише сприйняття, а й розуміння контексту – наприклад, ідентифікацію знайомої сцени або розпізнавання потенційної загрози. Крім того, зорова кора залучається до процесів уяви, даючи змогу «бачити» образи без зовнішніх подразників, що важливо для планування, навчання та творчості.

У технологіях компенсації зору зорова кора є ключовою мішенню: саме її здатність до обробки сигналів використовується у системах штучного зору. Зокрема, кортикальні імпланти стимулюють нейрони саме цієї ділянки мозку, викликаючи фосфени, з яких формуються базові зорові образи [6-10]. Паралельно, завдяки нейропластичності, зорова кора може адаптуватися до альтернативних сенсорних сигналів, залучаючись до міжсенсорної інтеграції.

Таким чином, функціональна спеціалізація, ієрархічна структура та пластичність зорової кори роблять її не лише основою природного зору, а й ключовим елементом у розробці сучасних нейротехнологій.

2.4 Феномен фосфенів як зоровий ефект

Фосфени – це суб’єктивні світлові спалахи, що виникають без зовнішнього світлового стимулу і сприймаються як точки, плями або візерунки.

У загальному випадку вони можуть бути викликані механічним тиском на сітківку або патологічними станами, такими як мігрень. Однак, окрім цього, існують шляхи, що викликають фосфени шляхом електричної стимуляції зорової кори чи зорового нерва [6-9].

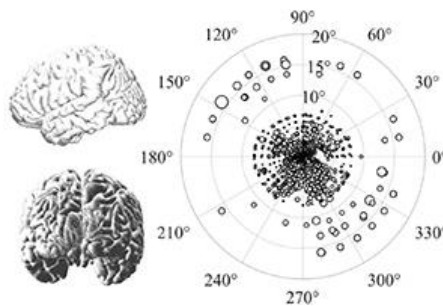


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення конектому фосфенів

У контексті технологій компенсації зору фосфени є ключовим елементом, оскільки їх можна штучно генерувати за допомогою імплантованих електродів, наприклад, у ретинальних чи кортикальних імплантах.

Механізм виникнення фосфенів пов’язаний із прямою активацією нейронів у зоровій системі. Наприклад, електрична стимуляція зорової кори викликає локалізовану активність нейронів, що інтерпретується мозком як світлові сигнали. У системах штучного зору, таких як Argus II або Orion, фосфени формують низькороздільні образи, що дозволяють розпізнавати контури чи великі об’єкти. Однак обмежена кількість електродів і складність точкової стимуляції нейронів призводять до низької роздільної здатності, що є викликом для сучасних технологій.

Особливістю фосфенів є їхній статичний характер, зумовлений ретинотопічною організацією зорової системи, що визначає просторове розташування активованих нейронів у конкретної людини.

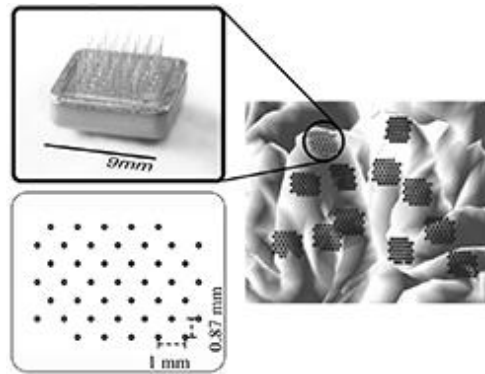


Рисунок 2.7 – Хірургічне планування

Проте дослідження демонструють, що розташування фосфенів у полі зору часто не відповідає прямолінійному розташуванню нейронів у зоровій корі [8], що створює значні виклики для розробки імплантів.

Важливо зазначити, що стимуляція окремих нейронів або їхніх груп часто не генерує передбачуваного відображення фосфенів, а радше формує складну, нелінійну структуру візуальних ефектів, яка залежить від індивідуальних особливостей нейронної архітектури [6; 8].

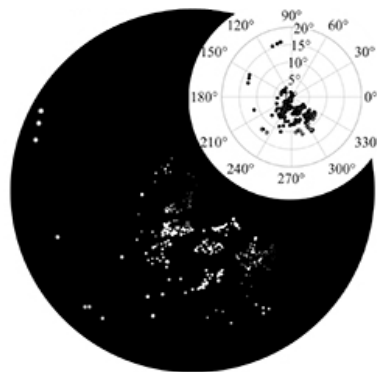


Рисунок 2.8 – Мапа фосфенів, придатних до активації

Цей факт робить задачу встановлення відповідності між фосфенами та конкретними ділянками зорової кори однією з найважливіших у розробці нейроінтерфейсів. Точне картографування фосфенів вимагає детального аналізу ретинотопії та адаптації стимуляційних параметрів, щоб забезпечити передбачуване і функціональне візуальне сприйняття.

Додатковою проблемою стає і неоднорідність нейронної активації. Зорова кора складається з мільйонів нейронів, кожен із яких має специфічні рецептивні поля, що реагують на певні візуальні стимули, такі як орієнтація ліній чи рух. Електрична стимуляція через імпланти зазвичай активує групи нейронів, а не окремі клітини, що призводить до розмитих або спотворених фосфенів [6; 8].

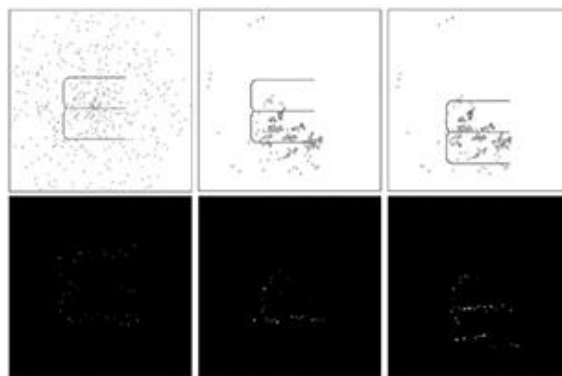


Рисунок 2.9 – Передбачуваний результат стимуляції

Крім того, фосфени можуть варіюватися за яскравістю, розміром, формою та навіть кольоровим відтінком, що залежить від низки параметрів електричної стимуляції – зокрема сили струму, частоти та тривалості імпульсу [9]. У деяких користувачів фосфени сприймаються як світлі точки, у інших – як спалахи, смуги, кільця або навіть розмиті плями [7]. Іноді вони можуть мати відтінки білого, сірого, жовтого чи синього кольору [7], хоча контроль кольору залишається складним завданням. Така варіативність ускладнює формування стабільних і передбачуваних візуальних образів.

Ще одним викликом є просторове сприйняття фосфенів, яке не завжди точно відповідає анатомічній організації зорової кори. Щоб покращити точність та якість зорових патернів, дослідники зосереджуються на збільшенні щільності електродних масивів, а також на інтелектуальному керуванні стимуляцією з урахуванням індивідуальних особливостей нейронної відповіді.

У цьому контексті важливо враховувати відмінності між фовеальним (центральним) і периферичним зором. У нормальному зоровому сприйнятті фовеа (центральна ямка сітківки) відповідає за найвищу гостроту зору й розпізнавання деталей, тоді як периферія забезпечує орієнтацію в просторі та виявлення руху. У фосфенних системах відтворення цього розподілу вкрай складне, оскільки щільність електродів зазвичай недостатня для імітації високодеталізованого фовеального зору. У результаті більшість стимуляцій мають переважно периферичний характер – формуючи розріджені, загальні контури об'єктів, які можна інтерпретувати лише після тривалого тренування.

Незважаючи на ці виклики, фосфени залишаються цінним інструментом для компенсації втрати зору. Їхня простота дозволяє створювати базові візуальні відчуття навіть у осіб із повною втратою периферичних зорових шляхів.

Можна сказати, що феномен фосфенів є центральним елементом сучасних нейротехнологій, спрямованих на відновлення зорових функцій. Хоча їхній інколи несподіваний характер створює значні технічні виклики, фосфени відкривають унікальну можливість для створення альтернативного зорового сприйняття, використовуючи природну здатність мозку інтерпретувати нейронні сигнали. Подальші дослідження в цій галузі, зокрема в напрямку точного картування нейронної активності та вдосконалення інтерфейсів стимуляції, мають потенціал значно розширити функціональність систем штучного зору, наближаючи їх до природного сприйняття.

2.5 Нейропластичність

Нейропластичність – це здатність мозку змінювати свою структуру та функціональні зв'язки у відповідь на навчання, досвід, травми або сенсорні зміни. У контексті втрати зору вона виступає ключовим механізмом адаптації, що дозволяє використовувати альтернативні канали сприйняття для компенсації втрачених зорових функцій.

Завдяки цій властивості зорова кора, що зазвичай обробляє візуальні сигнали, у незрячих осіб може бути залучена для сприйняття інформації з інших модальностей – таких як дотик чи слух [4]. Цей процес супроводжується формуванням нових нейронних зв'язків і активацією коркових зон, які раніше були пов'язані винятково із зором.

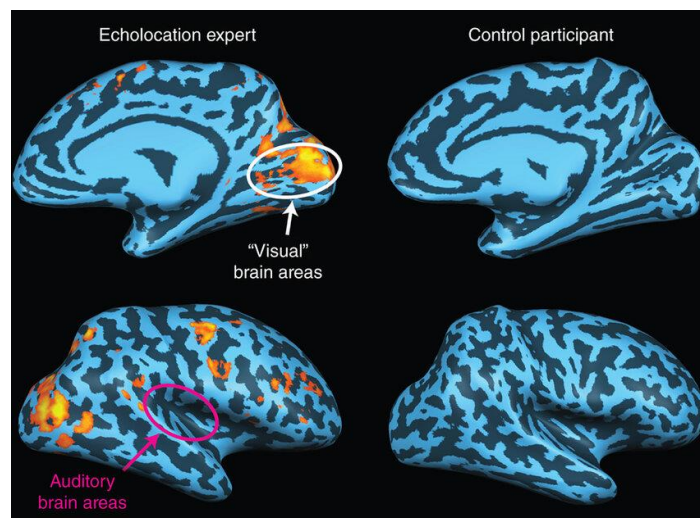


Рисунок 2.10 – Візуалізація активації зорової кори при обробці аудіосигналів

Цей нейрофізіологічний феномен лежить в основі сучасних технологій сенсорної субституції та нейроінтерфейсів, що дозволяють створювати функціональні аналоги зору без участі сітківки або зорового нерва. Така адаптація можлива завдяки високій гнучкості нейронних мереж і здатності мозку перебудовуватися відповідно до нових умов сенсорного сприйняття.

Нейропластичність відіграє ключову роль у сприйнятті штучно індукованих зорових стимулів (фосфенів), що виникають унаслідок електричної стимуляції сітківки або зорової кори. Первинно такі стимули сприймаються як ізольовані світлові спалахи, однак за умов систематичного тренування мозок поступово адаптується, навчаючись інтерпретувати їх як осмислені зорові патерни – контури, форми, символи або орієнтири в просторі.

Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту дозволяє значно вдосконалити ці системи, зокрема шляхом точнішого картографування фосфенів і оптимізації параметрів стимуляції. Це підвищує роздільну здатність та якість штучного зорового образу, сприяючи глибшій когнітивній адаптації та кращому орієнтуванню в просторі.

Процес адаптації є тривалим і потребує значних когнітивних зусиль. Його ефективність залежить не лише від технологічної складової, а й від індивідуальних факторів: віку, анатомо-функціональної будови мозку та попереднього сенсорного досвіду. У дітей нейропластичність вища, що забезпечує швидше формування нових асоціативних зв'язків, тоді як у дорослих цей процес повільніший, проте можливий за умови регулярного тренування.

Отже, нейропластичність є не лише фізіологічною основою технологій сенсорної заміни, а й ключовим фактором їхньої ефективності. Саме вона забезпечує здатність мозку інтегрувати нові сенсорні дані та формувати функціональні еквіваленти зору, відкриваючи нові можливості для повноцінної участі незрячих осіб у візуальній взаємодії зі світом.

3 МАТЕМАТИЧНЕ ПОДАННЯ АЛГОРИТМУ

Математичне моделювання зорового сприйняття є ключовим інструментом для розуміння та імітації процесів обробки візуальної інформації в біологічних системах, а також для розробки технологій компенсації втрати зору. Процес моделювання починається з розробки алгоритму, що описує етапи обробки сигналу, після чого він формалізується у вигляді математичної моделі, що дозволяє відтворити фізіологічні механізми та реалізувати їх у вигляді обчислювальних процедур.

3.1 Опис алгоритму

Алгоритм являє собою впорядковану послідовність операцій, спрямованих на розв'язання задачі моделювання зорового сприйняття через фосфени. Він включає етапи фільтрації, аналізу та візуалізації, що забезпечують виокремлення ключової інформації про форму та розташування об'єктів у кадрі.

Схема алгоритму (рисунок 3.1) відображає послідовність основних етапів обробки, спрямованих на моделювання фосфенного зору шляхом перетворення вхідних даних на абстрактне представлення.

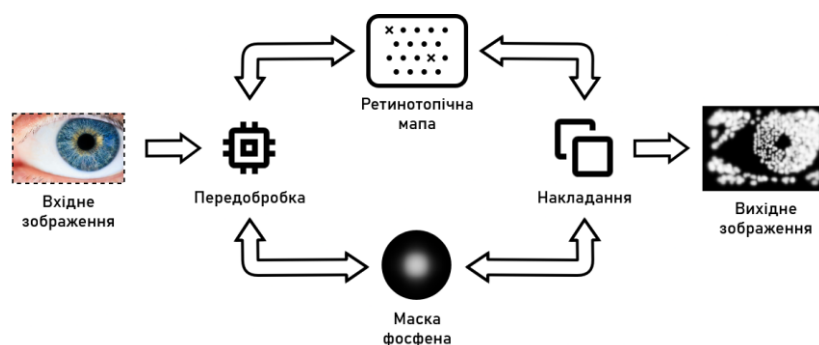


Рисунок 3.1 – Схема алгоритму

Процес обробки розпочинається з отримання вхідного кадру, що може бути окремим зображенням або частиною відеопотоку.

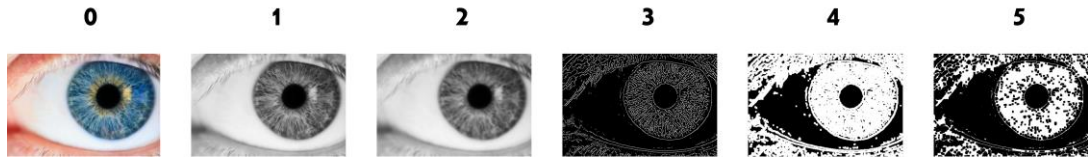


Рисунок 3.2 – Ланцюжок передобробки вхідного кадру

На етапі попередньої обробки кадр піддається багатоступеневій фільтрації (рисунок 3.2) для виокремлення ключових контурів, що несуть основну інформацію про форму та розташування об'єктів. Він включає:

- підготовку (перетворення у відтінки сірого, розмиття);
- виокремлення структурних ліній (оператор Кенні);
- морфологічні операції (дилатація – розширення активних областей для підсилення контурів, ерозія – видалення надлишкових пікселів та дрібних артефактів для формування чітких областей активації).

На основі кадру формується ретинотопічна мапа фосфенів – масив точок, що моделюють потенційні позиції активації у зоровій корі. Координати цих точок визначаються з урахуванням заданої роздільної здатності мапи, параметрів деградації (які імітують ступінь порушення зору в пацієнта), а також нерівномірного просторового розподілу, що моделюється за допомогою гаусового шуму.

Особливістю алгоритму є врахування біологічних характеристик зорової системи, зокрема відмінностей між двома різними зонами сітківки: фовеа та периферією. Для реалізації такого фосфени, розташовані ближче до центру кадру, мають менший розмір і вищу щільність, що забезпечує підвищену деталізацію в центральній зоні зору. Натомість фосфени, що знаходяться далі від центру, збільшуються в розмірі відповідно до їхньої відстані від центральної точки.

Таким чином, масштабування базового розміру фосфенів залежно від нормалізованої відстані до центру кадру забезпечує відповідність просторовим характеристикам зорового сприйняття.

На завершальному етапі алгоритм зіставляє виявлені контури з ретинотопічною мапою. У точках перетину контурів із потенційними положеннями фосфенів формуються світлові еліпси, розмір і форма яких визначаються заданими параметрами моделювання.



Рисунок 3.3 – Приклад зображення, отриманого через фосфени

Результатом є абстрактне зображення, що відтворює форму об'єктів у кадрі у вигляді динамічних фосфенів (рисунок 3.3). Такий підхід наближує отримане зображення до зорового сприйняття, характерного для користувачів кортикальних імплантів. Розмиття еліпсів сприяє формуванню умовно впізнаваного візуального образу, що передає основні риси об'єктів.

Гнучкість параметрів візуалізації дозволяє адаптувати алгоритм до різних сценаріїв моделювання фосфенного зору, включно з імітацією різного рівня деталізації, контрастності та щільності стимуляції. Це робить запропонований підхід перспективним інструментом для біомедичних досліджень, пов'язаних із розробкою нейроінтерфейсів та вивченням альтернативних каналів сенсорного сприйняття.

3.2 Математичне представлення

3.2.1 Просторове кодування зображень у візуальній системі

Просторове кодування зображень є основою зорового сприйняття, що дозволяє мозку перетворювати складні візуальні сцени на сукупність зрозумілих ознак, таких як контури, межі та області з різною яскравістю. У біологічній зоровій системі цей процес починається вже в сітківці: гангліозні клітини реагують на локальні зміни інтенсивності світла у рецептивних полях, виокремлюючи просторові структури та контраст. Подібний принцип використовується в алгоритмах комп'ютерного зору, де виявлення меж та градієнтів дозволяє виділити основні структурні елементи зображення.

У моделюванні зорового сприйняття цей процес імітується за допомогою методів, що нагадують граничне виявлення у CV. Найбільш фізіологічно обґрунтованим та ефективним вважається алгоритм Кенні, оскільки поєднує декілька етапів обробки [12]:

- згладжування сигналу;
- виявлення градієнтів;
- придушення немаксимумів;
- порогова фільтрація.

Гауссове згладжування – це тип фільтру розмивання зображення для зменшення шуму, що використовує двовимірну функцію Гауса для розрахунку трансформації кожного пікселя у зображенні:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.1)$$

де x, y – координати точки зображення;

σ – параметр розмиття, що моделює розсіювання сигналу.

Тоді згладжене зображення буде виглядати як результат згортки між вхідним зображенням та рецептивним фільтром:

$$I_{blur}(x, y) = (I * G)(x, y) = \sum_i \sum_j I(x - i, y - j) \cdot G(i, j), \quad (3.2)$$

де $I(x, y) \in [0, 255]$ – вхідне зображення, подане у відтінках сірого;

G – ядро гаусового фільтра.

Далі за допомогою одного з операторів виявлення контурів (наприклад, Собеля) обчислюється градієнт яскравості, що повертає значення для першої похідної в горизонтальному та вертикальному напрямках:

$$|\nabla I_{blur}(x, y)| = \sqrt{(G_x * I_{blur})^2 + (G_y * I_{blur})^2}, \quad (3.3)$$

де $G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ – ядра оператора Собеля.

Контури відзначаються там, де градієнт зображення набуває максимального значення. Однак вони можуть бути орієнтованими у різних напрямках, тому алгоритм використовує набір із чотирьох орієнтацій для аналізу: горизонтальна (0°), вертикальна (90°) та дві діагональні (45° і 135°).

Відтак кут орієнтації контуру в кожній точці (напрямок градієнта) з подальшим округленням до одного з чотирьох напрямків визначається як:

$$\theta(x, y) = \arctg_2(G_y * I_{blur}, G_x * I_{blur}), \quad (3.4)$$

де $\arctg_2(y, x) \in (-\pi; \pi]$ – функція арктангенса з двома аргументами, що обчислює кут напрямку вектора у полярній системі координат.

Ці значення дозволяють не лише оцінити силу локальної зміни яскравості, але й визначити напрямок, у якому цей контраст виникає.

Алгоритм Кенні завершується придушенням немаксимумів, подвійною пороговою фільтрацією та трасуванням контурів [12], у результаті формуючи бінарну мапу контурів:

$$C(x, y) \in \{0, 1\}^{M \times N}, \quad (3.5)$$

де $M \times N$ – роздільна здатність зображення, пікселів;

$C(x, y) = 1$ – активний контур.

Подібні методи відображають природну здатність зорової системи фокусуватися на ключових елементах, ігноруючи менш значущі деталі, що є особливо важливим для нейропротезів, які передають обмежений набір сигналів до мозку.

Таким чином, замість складних нейронних обчислень можна застосувати техніки, що підкреслюють контрастні переходи в зображенні, створюючи спрощене представлення сцени.

3.2.2 Ретинотопічна організація та картографування зорової кори

Ретинотопічна організація є ключовою особливістю зорової системи, що забезпечує збереження просторового порядку зображення від сітківки до зорової кори. Кожна точка на сітківці проектується на відповідну ділянку в корі головного мозку, формуючи топографічну карту зорового поля. У комп'ютерному моделюванні зорового сприйняття ця властивість відтворюється за допомогою фосфенних мап – регулярних сіток точок, що імітують зони збудження нейронів у первинній зоровій корі (V1), аналогічно до розташування електродів у нейропротезах.

У реальних умовах положення доступних точок стимуляції визначається на основі попередніх медичних досліджень, функціонального картування кори та інтраопераційного тестування. Такі методи дозволяють встановити сталі просторові відповідності між електродами нейропротезу та відповідними ділянками зорового поля.

Однак у межах моделювання, де такі емпіричні дані відсутні або непотрібні, пропонується абстрактне представлення фосфенних мап як дискретного сітчастого поля:

$$P \in \{0, 1\}^{K \times L}, \quad (3.6)$$

де $K \times L$ – роздільність матриці;

$P(i, j) = 1$ – факт присутності фосфена на відповідній позиції.

З метою імітації біологічної та технічної варіабельності у модель вводиться ймовірнісний параметр пропуску фосфенів. Він відображає потенційні втрати, зумовлені, наприклад, несправністю окремих електродів, відсутністю збудження нейронів або низькою чутливістю рецепторного поля:

$$P(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \xi_{i,j} > p_{drop}, \\ 0 & \end{cases} \quad (3.7)$$

де $\xi_{i,j} \sim U[0,1]$ – рівномірно розподілена випадкова величина у точці;

$p_{drop} \in [0,1]$ – параметр, що визначає ймовірність пропуску фосфенів.

Таким чином, модель фосфенної мапи дозволяє реалізувати просторово-селективну стимуляцію з урахуванням анатомічної та функціональної організації зорової системи, а також відображає вплив деградації імплантованих пристроїв.

3.2.3 Моделювання перцептивного образу

Формування перцептивного образу в рамках моделювання зорового сприйняття спрямоване на відтворення того, як мозок інтерпретує штучні стимули для побудови візуального уявлення. Фосфени, викликані електричною стимуляцією сітківки або зорової кори, зазвичай сприймаються як світлові плями з нечіткими краями, форма яких варіюється залежно від індивідуальних нейрофізіологічних особливостей.

Для наближення моделі до реальної фізіології враховується нерівномірний розподіл рецепторів у сітківці: центральна зона (фовеа) характеризується вищою щільністю колбочок, що забезпечує високу роздільну здатність, тоді як периферія має меншу щільність і гіршу деталізацію. На мапі це може відображатися змінним розміром фосфенів – чим далі від центру, тим більший їх радіус:

$$r(i, j) = r_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_j - y_c)^2} \right), \quad (3.8)$$

де r_0 – базовий радіус у центрі зображення;

(x_c, y_c) – координати центру зображення;

α – коефіцієнт масштабування, що визначає, наскільки швидко зростає розмір фосфенів при віддаленні від центру.

Такий підхід дає змогу моделі відобразити як ретинотопічну організацію зорової системи, так і індивідуальні анатомічні особливості – зокрема, варіації в щільності рецепторів сітківки та просторове розташування електродів у складі нейропротезу. Як результат, в центрі зорового поля фосфени моделюються як менші й чіткіші, тоді як на периферії – великі й розмиті, що відображає природну фізіологію зору.

Кожен фосфен представляється у вигляді двовимірної гаусової функції, центрованої у відповідній точці сітки:

$$\Phi_{i,j}(x, y) = e^{-\frac{(x-x_i)^2+(y-y_j)^2}{2\sigma_{i,j}^2}}, \quad (3.9)$$

де $\sigma_{i,j} = \frac{r(i,j)}{k}$ – ступінь розмиття, пропорційний до розміру фосфена.

Оскільки в реальності фосфени не мають ідеально круглої форми, їх геометрія може бути описана як еліпс:

$$\frac{(x-x_i)^2}{a_{i,j}^2} + \frac{(y-y_j)^2}{b_{i,j}^2} \leq 1, \quad (3.10)$$

де (x_i, y_j) – координати центру фосфена у площині зображення;

$a_{i,j}$ та $b_{i,j}$ – півосі еліпса.

Однак через варіативність візуального сприйняття таких світлових плям пропонується запровадити деформацію їхніх півосей:

$$a_{i,j} = r(i, j) \cdot \xi_a, \quad b_{i,j} = r(i, j) \cdot \xi_b, \quad (3.11)$$

де $\xi_a, \xi_b \sim U[0.8, 1.2]$ – випадкові коефіцієнти деформації ($\pm 20\%$ від 1).

Це дозволяє відтворити природну варіативність сприйняття, яка виникає внаслідок складної просторової взаємодії між електродами та нейронними структурами. Деформація фосфенів покращує відповідність моделі реальному досвіду, де форма зорових відчуттів часто відхиляється від ідеалізованих геометричних уявлень.

3.2.4 Формалізація та оцінка якості

Активация фосфена в моделі визначається через формалізовану функцію, що залежить від ймовірності випадіння та наявності ознак (контурів) у межах області фосфена. Таким чином, індикатор активації фосфена в позиції задається як:

$$P_{en}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P(i, j) = 1 \wedge \exists(x, y) \in \Phi_{i, j}: C(x, y) = 1 \\ 0 & \end{cases}. \quad (3.12)$$

Вихідне перцептивне зображення моделі формується як суперпозиція всіх фосфенів, активованих у відповідних точках ретинотопічної карти. Для кожної активної позиції додається відповідна функція інтенсивності фосфена, утворюючи комплексне відображення:

$$I_{out}(x, y) = \sum_{(i, j): P_{en}(i, j)=1} \Phi_{i, j}(x, y). \quad (3.13)$$

Для кількісної оцінки якості відтвореного образу можна використати метрику відповідності між контурами та активованими фосфенами, що дозволить оцінити ступінь адекватності візуального відтворення. Однією з таких метрик є коефіцієнт Жаккара:

$$J(C, P_{en}) = \frac{|C \cap P_{en}|}{|C \cup P_{en}|}. \quad (3.14)$$

Запропонований підхід забезпечує узгоджене і фізіологічно обґрунтоване уявлення про те, як система штучного зору може передавати критичні візуальні ознаки, необхідні для інтерпретації середовища.

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

Програмне забезпечення, розроблене в рамках цієї роботи, базується на концепції вживлення кортикальних імплантів. Основна ідея полягає у створенні осмислених візуальних образів для незрячих осіб шляхом цілеспрямованої активації фосфенів – світлових спалахів, які виникають у зоровій корі внаслідок електричної стимуляції. На відміну від хаотичних візуальних артефактів, запропонований підхід спрямований на формування структурованих зображень, що відображають ключові елементи об'єктів у полі зору.

Для реалізації програмного забезпечення було використано мову програмування Python, яка забезпечує гнучкість і ефективність у розробці. Технологічний стек також включає такі бібліотеки, як:

- OpenCV (надає потужні інструменти для обробки зображень і відео);
- NumPy (використовується для ефективних числових обчислень, роботи з масивами та реалізації математичних алгоритмів, що лежать в основі генерації фосфенної мапи);
- PyQt6 (забезпечує створення інтуїтивно зрозумілого графічного інтерфейсу користувача).

Поєднання цих бібліотек створює синергетичний ефект, дозволяючи реалізувати складні алгоритми обробки даних із високою продуктивністю та гнучкістю. Розроблений додаток не лише демонструє потенціал фосфенного зору, але й відкриває перспективи для подальших досліджень у галузі нейропротезування, зокрема для оптимізації алгоритмів стимуляції зорової кори та адаптації їх до індивідуальних потреб користувачів.

4.1 Структура додатку

Програмне забезпечення має модульну архітектуру, що забезпечує чіткий розподіл обов'язків між основними частинами системи. Такий підхід дозволяє уникати дублювання коду, полегшує технічний супровід, спрощує внесення змін і забезпечує гнучкість під час масштабування функціональності.

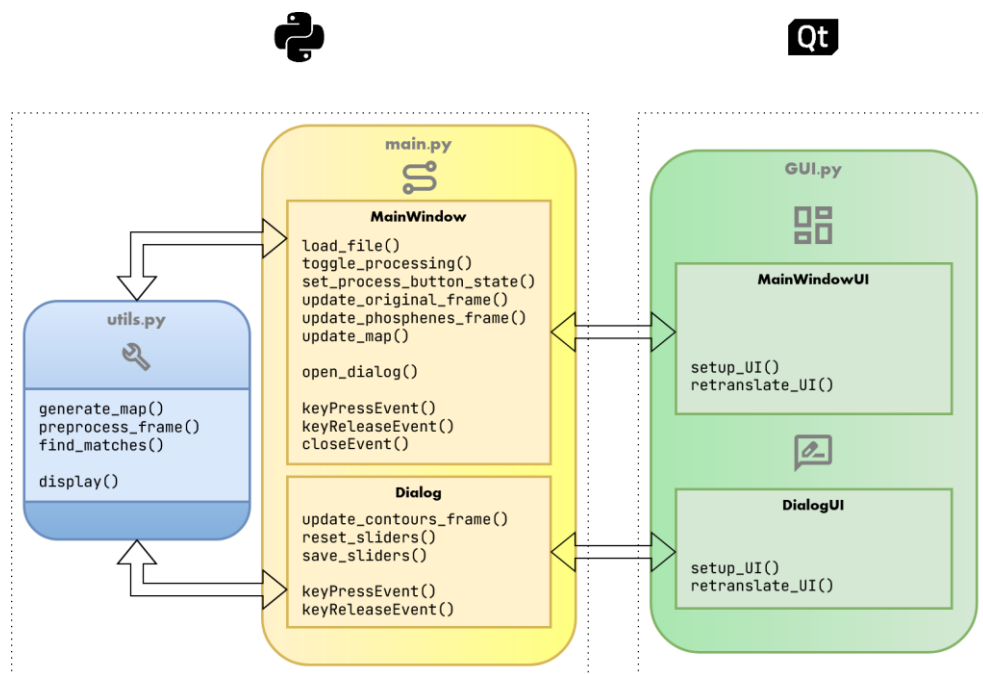


Рисунок 4.1 – Структура додатку

Додаток структуровано у вигляді трьох основних програмних модулів (рисунок 4.1), кожен з яких виконує окрему функціональну роль у межах системи:

- `main.py` (об'єднує основну керуючу логіку та реалізує взаємодію між компонентами);
- `utils.py` (містить набір функціональних методів для обробки зображень та моделювання фосфенної стимуляції);
- `GUI.py` (відповідає за створення та опис GUI-елементів).

Завдяки модульній організації структура програми є логічно впорядкованою й прозорою, що відповідає сучасним принципам проектування програмного забезпечення – зокрема високій когерентності (внутрішній узгодженості модулів) та низькій зв'язності (мінімальній залежності між ними). Це сприяє простоті розширення функціональності, повторному використанню окремих компонентів, ефективному тестуванню та підтримці програмного коду.

Особливістю архітектури є чітке розмежування між інтерфейсними елементами та логікою обробки зображень, що забезпечує обчислювальні операції окремо від представлення користувацького інтерфейсу. Такий підхід сприяє чіткому розмежуванню відповідальностей та підтримує принципи архітектурного шаблону MVC (Model–View–Controller).

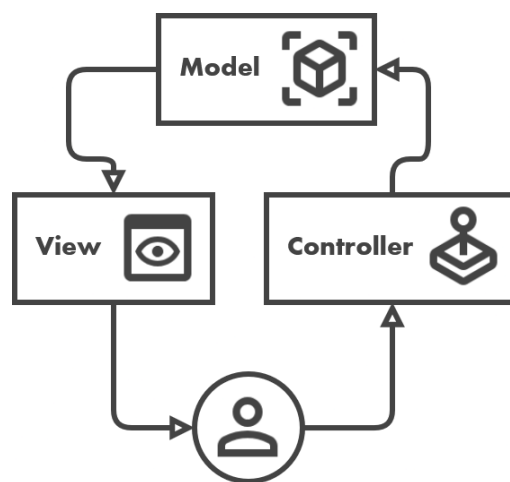


Рисунок 4.2 – Діаграма взаємодій у MVC

Взаємодія між інтерфейсом і функціональними модулями реалізується через сигналізовану модель подій, що забезпечує асинхронне та кероване реагування на дії користувача.

Узагальнюючи, можна зазначити, що розроблена структура додатку є збалансованою, масштабованою та добре адаптованою до потреб подальшої розробки, що відповідає сучасним вимогам до побудови програмних систем.

4.1.1 Головний модуль

Модуль `main.py` виконує функцію центрального координатора в архітектурі додатку. Він об'єднує ключові компоненти користувацького інтерфейсу та забезпечує взаємодію між окремими частинами системи. У межах цього модуля реалізовано два основні класи, що відповідають за логіку роботи з програмою в основному та діалоговому вікнах

Основне вікно (клас `MainWindow`) реалізує ключові механізми роботи програми, зокрема:

- завантаження вхідних даних (зображень або відео);
- запуск алгоритмів обробки;
- керування таймерами;
- обробку змін параметрів симуляції;
- оновлення відображення результатів;
- виклик діалогового вікна.

Оскільки відео являє собою не статичне зображення, а безперервний потік кадрів, для його коректної обробки необхідний механізм, що забезпечить регулярне оновлення відображення з заданим часовим інтервалом. Такий механізм реалізовано за допомогою таймерів, які визначають частоту оновлення кадрів.

Частота оновлення зображення у фосфенній симуляції зазвичай є обмеженою і залежить як від технології, так і від стабільності реакції зорової кори [9]. З огляду на це, у КС застосовуються два незалежні таймери з різними інтервалами. Один відповідає за оновлення вхідного зображення, інший – за генерацію вихідного зображення у вигляді карти фосфенів.

У системах зорової стимуляції ключову роль відіграє частота стимуляції (Гц) – вона визначає, як часто зоровий протез генерує імпульси для виклику фосфенів. Водночас частота кадрів (кадр/с) відображає швидкість оновлення зображень у симуляції, що безпосередньо впливає на плавність і точність візуального сприйняття.

Відповідно якщо припустити, що кожен імпульс стимуляції відповідає одному оновленому зображенню, можна вважати, що частота стимуляції в Гц і FPS у кадрах за секунду є еквівалентними. У такому випадку інтервал між окремими оновленнями симульованого зору можна виразити у мілісекундах як величину, обернену до кадрової частоти:

$$T_F = \frac{1000}{FPS}, \quad (4.1)$$

де T_F – інтервал між оновленнями кадрів, мс;

FPS – частота кадрів, кадр/с.

Таким чином, застосування таймерів дозволяє синхронізувати два відеопотоки, забезпечуючи узгоджене моделювання візуального сприйняття навіть при різних інтервалах оновлення кадрів (лістинг 4.1).

Лістинг 4.1 – Ініціалізація таймерів

```
self.fps_1 = 60
self.timer_1 = QTimer(self)
self.timer_1.setInterval(int(1000 / self.fps_1))

self.fps_2 = 30
self.timer_2 = QTimer(self)
self.timer_2.setInterval(int(1000 / self.fps_2))
```

Для взаємодії між компонентами Qt використовує власний механізм – принцип сигналів і слотів (Signals & Slots), який забезпечує більш гнучку та безпечну комунікацію. У цьому контексті сигнал – це подія, що виникає у відповідь на дію користувача або внутрішню зміну стану, а слот – це метод, який приймає сигнал і виконує відповідну обробку [14].

Так, наприклад, при зміні вмісту GUI-віджетів автоматично генерується сигнал, який передається відповідній функції (лістинг 4.2).

Лістинг 4.2 – Підключення сигналів до слотів

```
self.ui.upload_button.clicked.connect(self.load_file)
self.ui.process_button.clicked.connect(self.toggle_processing)
self.ui.degradation_sb.valueChanged.connect(self.update_map)
self.ui.resolution_sb_1.valueChanged.connect(self.update_map)
self.ui.resolution_sb_2.valueChanged.connect(self.update_map)
self.ui.contours_button.clicked.connect(self.open_dialog)

self.timer_1.timeout.connect(self.update_original_frame)
self.timer_2.timeout.connect(self.update_phosphenes_frame)
self.ui.fps_sb.valueChanged.connect(lambda value:
    self.timer_2.setInterval(int(1000 / value)))
```

Такий підхід дозволяє забезпечити чітку реакцію інтерфейсу на дії користувача без необхідності ручного контролю за кожним етапом взаємодії, що робить розробку більш структурованою та масштабованою.

Лістинг 4.3 – Функція для завантаження нового файлу

```
def load_file(self):
    file_path, _ = QFileDialog.getOpenFileName(
        self, "Виберіть медіафайл", "resources/input",
        "Media (*.png *.jpg *.jpeg *.mp4)")
    if file_path.lower().endswith((".png", ".jpg", ".jpeg")):
        self.img = cv.imread(file_path)
        display(self.img, self.ui.input_graphics)
    else:
        self.cap = cv.VideoCapture(file_path)
        success, frame = self.cap.read()
        if success:
            display(frame, self.ui.input_graphics)
```

Лістинг 4.4 – Функція оновлення відображення кадрів

```
def update_original_frame(self):
    success, frame = self.cap.read()
    if frame is None:
        self.cap.set(cv.CAP_PROP_POS_FRAMES, 0)
        return
    self.frame_pos = self.cap.get(cv.CAP_PROP_POS_FRAMES)
    display(frame, self.ui.input_graphics)

def update_phosphenes_frame(self):
    phosphenes = find_matches(self.frame,
        self.phosphenes_positions, self.settings)
    display(None, self.ui.output_graphics, "phosphenes",
        self.original_shape, phosphenes)
```

Крім того, передбачено механізм повного скидання стану застосунку (лістинг 4.5), що очищає графічні сцени та зупиняє усі таймери, дозволяючи повернутися до початкового стану системи без потреби перезапуску додатку.

Лістинг 4.5 – Функція скидання

```
def full_reset(self):
    self.ui.input_graphics.scene().clear()
    self.ui.output_graphics.scene().clear()
    self.timer_1.stop()
    self.timer_2.stop()
```

Діалог (клас `Dialog`) реалізує інтерфейс для конфігурації параметрів фільтрації. За допомогою інтерактивних елементів, таких як слайдери (повзунки), користувач має змогу налаштувати значення для кожного етапу обробки зображення – зокрема розмиття, контурного виявлення, дилатації та ерозії. Після підтвердження вибраних значень вони зберігаються та передаються до основного вікна, де безпосередньо інтегруються у процес створення фосфенного зображення.

Лістинг 4.6 – Оновлення відображення контурів

```
def update_contours_frame(self):
    self.temp_settings = {
        "blur": self.ui.blur_slider.value(),
        "contour": self.ui.contour_slider.value(),
        "dilate": self.ui.dilate_slider.value(),
        "erode": self.ui.erode_slider.value()
    }
    self.contours = preprocess_frame( self.main_window.frame,
                                     self.temp_settings)
    display(self.contours, self.ui.graphics, "contours")
```

Лістинг 4.7 – Збереження налаштувань

```
def save_sliders(self):
    if self.main_window.settings != self.temp_settings:
        self.main_window.settings.clear()
        self.main_window.settings.update(self.temp_settings)
        self.main_window.update_phosphenes_frame()
```

Обробка натискання клавіш відіграє важливу роль у функціональності обох вікон інтерфейсу. Механізм реалізовано через перевизначення методів `KeyPressEvent` та `keyReleaseEvent` (лістинг 4.8), які дозволяють обробляти події клавіатурного вводу з урахуванням стану клавіш. Для коректної підтримки кириличної розкладки клавіатури застосовуються відповідні числові коди символів (наприклад, 1043 – «Г», 1057 – «С», 1050 – «К»), що гарантує стабільну роботу гарячих клавіш незалежно від мови введення.

Таблиця 4.1 – Гарячі клавіші

Клавіша	Дія	Функція
Головне вікно		
U (Г)	Натискає кнопку завантаження	<code>upload_button()</code>
Enter	Натискає кнопку обробки	<code>process_button()</code>
C (С)	Натискає кнопку виявлення контурів	<code>contours_button()</code>
R (К)	Оновлює мапу фосфенів	<code>update_map()</code>
Delete	Повне скидання	<code>full_reset()</code>
Escape	Закриває застосунок	<code>close()</code>
Діалогове вікно		
R (К)	Натискає кнопку скидання змін	<code>reset_button()</code>
Enter	Натискає кнопку застосування змін	<code>apply_button()</code>
Escape	Закриває вікно	<code>close()</code>

Важливо зазначити, що реалізація гарячих клавіш у системі орієнтована не на безпосередній виклик функцій, а саме на імітацію натискання відповідних кнопок інтерфейсу. Такий підхід забезпечує узгодженість взаємодії – незалежно від способу активації (миша чи клавіатура) завжди виконується один і той самий обробник події. Це спрощує запам'ятовування відповідностей між клавішами та діями, покращує логіку інтерфейсу та загальний користувацький досвід.

Крім того, обробка подій здійснюється саме під час відпускання клавіші, що дозволяє уникнути передчасного або багатократного виклику функцій. Для цього вимкнено автоматичне повторення натискання, що забезпечує більш стабільну та передбачувану поведінку.

Лістинг 4.8 – Обробники натискання клавіш в головному вікні

```
def keyPressEvent(self, event):
    key = event.key()
    match key:
        case Qt.Key.Key_U | 1043: # Г
            self.ui.upload_button.setDown(True)
        case Qt.Key.Key_Return:
            self.ui.process_button.setDown(True)
        case Qt.Key.Key_C | 1057: # C
            self.ui.contours_button.setDown(True)

def keyReleaseEvent(self, event):
    if event.isAutoRepeat():
        return

    key = event.key()
    match key:
        case Qt.Key.Key_U | 1043: # Г
            self.ui.upload_button.setDown(False)
            self.ui.upload_button.click()
        case Qt.Key.Key_Return:
            self.ui.process_button.setDown(False)
            self.ui.process_button.click()
        case Qt.Key.Key_C | 1057: # C
            self.ui.contours_button.setDown(False)
            self.ui.contours_button.click()
        case Qt.Key.Key_R | 1050: # K
            self.update_map()
        case Qt.Key.Key_Delete:
            self.full_reset()
        case Qt.Key.Key_Escape:
            self.close()
```

Узагальнюючи, можна сказати, що система обробки клавіш реалізована таким чином, аби забезпечити максимально інтуїтивну, передбачувану і доступну взаємодію з інтерфейсом, водночас зберігаючи його функціональну узгодженість і готовність до подальшого масштабування.

Також перевизначено функцію звільнення ресурсів (лістинг 4.9) при завершенні роботи програми, що гарантує коректне завершення процесів і уникнення витоків пам'яті.

Лістинг 4.9 – Функція для звільнення ресурсів

```
def closeEvent(self, event):
    if self.cap:
        self.cap.release()
        self.timer_1.stop()
        self.timer_2.stop()
    event.accept()
```

Точка входу (лістинг 4.10) представляє стандартну структуру запуску Qt-застосунку. У цьому фрагменті створюється головний об'єкт застосунку (QApplication), ініціалізується та виводиться головне вікно. Весь процес завершується запуском основного циклу подій програми через метод exec().

Лістинг 4.10 – Точка входу

```
if __name__ == "__main__":
    app = QApplication(sys.argv)
    window = MainWindow()
    window.show()
    sys.exit(app.exec())
```

Таким чином, файл main.py виконує роль центрального координаційного модуля всього програмного середовища, поєднуючи в собі як взаємодію з користувачем через графічний інтерфейс, так і логіку виклику основних алгоритмів обробки, реалізованих у допоміжних модулях. Саме через цей модуль ініціалізується головне вікно, встановлюються зв'язки між елементами інтерфейсу й обчислювальними функціями та запускається цикл подій.

4.1.2 Функціональний модуль

Модуль `utils.py` виступає функціональним ядром програмного забезпечення, забезпечуючи реалізацію основних обчислювальних процедур, незалежних від графічного інтерфейсу користувача. Саме в цьому модулі зосереджено алгоритмічну логіку, яка відповідає за обробку вхідних зображень та моделювання фосфенної відповіді – від попередньої обробки до генерації результату, що виводиться у вигляді симульованого зору.

У межах модуля реалізовано низку ключових функцій, кожна з яких виконує окрему операцію або етап обчислювального процесу, а саме:

- `generate_map()`;
- `preprocess_frame()`;
- `find_matches()`;
- `display()`.

Таке розділення забезпечує високу модульність і гнучкість системи, дозволяючи легко адаптувати або замінювати окремі елементи алгоритму без необхідності втручання в інші частини коду. Модуль `utils.py` не залежить від конкретного способу введення або виведення даних (GUI чи CLI), що дозволяє використовувати його як окрему бібліотеку обробки візуальної інформації або інтегрувати у сторонні проекти.

Крім того, функції модуля структуровано з урахуванням можливості повторного використання, що значно полегшує тестування, налагодження та розширення функціоналу.

Функція `generate_map` відповідає за формування просторової карти фосфенів відповідно до заданих параметрів, таких як роздільна здатність сітки, ймовірність випадкового виключення, базовий розмір елементів і коефіцієнт їх масштабування. В основі алгоритму лежить імітація сітки нейростимуляції з використанням гаусового шуму для варіації положень, що дозволяє досягти більш природного розташування фосфенів у межах кадру.

Лістинг 4.11 – Функція, що генерує позиції та розміри фосфенів на мапі

```

def generate_map(size, resolution, dropout_prob,
base_size_factor=3, scale_factor=3):
    h, w = size
    center_h, center_w = h / 2, w / 2
    sigma = min(h, w) / 4
    grid_h, grid_w = resolution
    base_size = min(h, w) * (base_size_factor / 100)
    potential_phosphenes = []
    for j in range(grid_h):
        for i in range(grid_w):
            if np.random.randint(0, 100) < dropout_prob:
                continue
            offset_y = np.random.normal(0, sigma / grid_h)
            offset_x = np.random.normal(0, sigma / grid_w)
            y = int(center_h+(j-grid_h/2)*(h/grid_h)+offset_y)
            x = int(center_w+(i-grid_w/2)*(w/grid_w)+offset_x)
            if 0 <= y < h and 0 <= x < w:
                distance=(np.sqrt((y-center_h)**2+
                    (x-center_w)**2) / max(h, w))
                size = int(base_size*(1+scale_factor*dist))
                potential_phosphenes.append((y, x, size))
    return potential_phosphenes

```

Для кожної потенційної точки координати зміщуються відносно центру кадру з урахуванням індексу вузла сітки, масштабованого під ширину або висоту відповідно:

$$x = \left\lfloor c_w + \left(i - \frac{g_w}{2}\right) \cdot \frac{w}{g_w} + \varepsilon_x \right\rfloor, y = \left\lfloor c_h + \left(j - \frac{g_h}{2}\right) \cdot \frac{h}{g_h} + \varepsilon_y \right\rfloor, \quad (4.2)$$

де w, h – ширина та висота кадру;

$c_w = \frac{w}{2}, c_h = \frac{h}{2}$ – координати центру кадру;

i, j – індекси ітерації по ширині та висоті сітки;

g_w, g_h – кількість точок сітки за шириною і висотою;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – випадкові зміщення з нормальним розподілом.

Додатково, щоб уникнути регулярності структури, до кожної координати додається нормально розподілене випадкове зміщення:

$$\varepsilon_x \sim N\left(0, \left(\frac{\sigma}{g_w}\right)^2\right), \varepsilon_y \sim N\left(0, \left(\frac{\sigma}{g_h}\right)^2\right), \quad (4.3)$$

де $\sigma = \frac{\min(h,w)}{4}$ – стандартне відхилення шуму.

Розмір фосфена залежить від його відстані до центру поля зору. Для цього використовується нормалізована евклідова відстань:

$$d = \frac{\sqrt{(y-c_h)^2 + (x-c_w)^2}}{\max(h,w)}. \quad (4.4)$$

Подальшу обробку відеокадру реалізує функція `preprocess_frame`, що виконує послідовність класичних етапів CV: переведення зображення у відтінки сірого, застосування фільтра Гауса для розмиття, виділення контурів оператором Кенні, а також морфологічну обробку з використанням операцій дилатації та ерозії.

Лістинг 4.12 – Попередня обробка зображення

```
def preprocess_frame(frame, settings):
    gray = cv.cvtColor(frame, cv.COLOR_BGR2GRAY)
    blur_size = settings["blur"] | 1
    blur = cv.GaussianBlur(gray, (blur_size, blur_size), 0)
    contour_value = settings["contour"]
    contour = cv.Canny(blur, contour_value / 2, contour_value)
    kernel = np.ones((5, 5), np.uint8)
    dilate_iter = settings["dilate"]
    erode_iter = settings["erode"]
    dilated = cv.dilate(contour, kernel, iterations=dilate_iter)
    eroded = cv.erode(dilated, kernel, iterations=erode_iter)

    return eroded
```

Функція `find_matches` виконує зв'язування між вхідним зображенням і моделлю фосфенів. Вона аналізує попередньо оброблений кадр. Якщо значення яскравості перевищує визначений поріг, фосфен вважається активним і вноситься до списку для подальшої візуалізації. Таким чином, функція виконує роль фільтрації та активації елементів моделі на основі аналізу реального вмісту зображення.

Лістинг 4.13 – Функція, що визначає спільні точки на контурах та мапі

```
def find_matches(frame, positions, settings):
    processed_frame = preprocess_frame(frame, settings)

    enabled_phosphenes = []
    for y, x, size in positions:
        if processed_frame[y, x] == 255:
            enabled_phosphenes.append((y, x, size))

    return enabled_phosphenes
```

Фінальне представлення результатів моделювання здійснюється за допомогою функції `display()`, що забезпечує інтеграцію оброблених даних у графічний інтерфейс користувача. Архітектура цієї функції побудована з урахуванням принципів розділення відповідальностей, що дозволило декомпонувати її на логічні блоки, відповідальні за обробку зображення, масштабування та рендеринг.

Функція підтримує три режими візуалізації, що дозволяє гнучко керувати поданням результатів:

- «original» (демонстрація оригінального відеопотоку);
- «contours» (виведення бінарного зображення контурів);
- «phosphenes» (побудова візуальної моделі фосфенів).

У межах процедури очищується попередня сцена `QGraphicsScene`, після чого залежно від обраного режиму формується відповідне зображення, що додається до віджета `QGraphicsView`.

Лістинг 4.14 – Відображення кадру у віджеті інтерфейсу

```
def display(frame, graphics_view, mode="original",
original_size=None, phosphenes=None):
    scene = graphics_view.scene()
    scene.clear()

    match mode:
        case "original" | "contours":
            if mode == "contours":
                frame = cv.cvtColor(frame, cv.COLOR_GRAY2BGR)
                ...

            scene.addItem(frame)

        case "phosphenes":
            ...

            scene.addItem(ellipse)
```

У перших двох режимах реалізується ланцюжок перетворень зображення: конвертація до кольорового формату (для випадку контурів), створення об'єкта QImage з урахуванням розмірності кадру, масштабування до розмірів віджета з підтримкою пропорцій, а також позиціонування централізовано у вікні виводу. Це гарантує коректне й адаптивне відображення кадру незалежно від його початкових розмірів чи формату.

Лістинг 4.15 – Конвертація оригінального кадру або контурів

```
if mode == "original":
    h, w, ch = frame.shape
    bytes_per_line = ch * w
    q_image = QImage(frame.data, w, h, bytes_per_line,
QImage.Format.Format_BGR888)
else:
    h, w = frame.shape
    bytes_per_line = w
    q_image = QImage(frame.data, w, h, bytes_per_line,
QImage.Format.Format_Grayscale8)

pixmap = QPixmap.fromImage(q_image).scaled(graphics_view.size(),
Qt.AspectRatioMode.KeepAspectRatio,
Qt.TransformationMode.SmoothTransformation)

item = QGraphicsPixmapItem(pixmap)
item.setPos((graphics_view.width() - pixmap.width()) / 2,
(graphics_view.height() - pixmap.height()) / 2)
```

У режимі фосфенної візуалізації функція виконує масштабування координат з урахуванням геометрії віджета, після чого для кожного активного фосфена створюється графічне представлення у вигляді еліпса. Його розміри модифікуються в межах допустимого діапазону за допомогою випадкових варіацій, що надає зображенню більш органічного вигляду.

Візуальний ефект доповнюється накладенням фільтра розмиття, що імітує вигляд за гаусіаном. Така реалізація дозволяє імітувати сприйняття фосфенів користувачем в умовах протезованого зору.

Лістинг 4.16 – Обчислення фосфену

```

scale_factor = min(graphics_view.width() / original_size[1],
graphics_view.height() / original_size[0])
offset_x = (graphics_view.width() - original_size[1] *
scale_factor) / 2
offset_y = (graphics_view.height() - original_size[0] *
scale_factor) / 2

for y, x, size, intensity in phosphenes:
    scaled_x = x * scale_factor + offset_x
    scaled_y = y * scale_factor + offset_y
    scaled_size = size * scale_factor

    ellipse = QGraphicsEllipseItem(
        QRectF(
            scaled_x - scaled_size,
            scaled_y - scaled_size,
            scaled_size * 2 * np.random.uniform(0.8, 1.2),
            scaled_size * 2 * np.random.uniform(0.8, 1.2)
        )
    )
    ellipse.setBrush(QBrush(QColor(255, 255, 255)))
    ellipse.setPen(QPen(Qt.PenStyle.NoPen))

    blur_effect = QGraphicsBlurEffect()
    blur_effect.setBlurRadius(scaled_size)
    ellipse.setGraphicsEffect(blur_effect)

```

Загалом, функціональний модуль забезпечує чітке розділення задач за етапами: генерація моделі, попередня обробка зображення, визначення активних елементів та їхнє візуальне представлення.

4.1.3 Модуль графічного інтерфейсу користувача

Модуль GUI.py відповідає за формування графічного інтерфейсу користувача, забезпечуючи детальний програмний опис усіх елементів візуального середовища програми. Він зосереджений виключно на побудові та налаштуванні інтерфейсної частини без втручання у бізнес-логіку чи обробку даних.

На відміну від традиційного підходу, що передбачає використання зовнішніх файлів опису у форматі UI, в розробленому застосунку графічний інтерфейс реалізовано безпосередньо в коді на мові Python. Такий підхід заснований на використанні Qt Designer для створення візуального макета з подальшою його конвертацією у PY-файл за допомогою спеціалізованого інструменту PYUIC (Python User Interface Compiler). Подібне рішення має низку переваг: воно дозволяє уникнути необхідності динамічного завантаження та парсингу UI під час виконання програми, забезпечує кращу інтеграцію з логікою застосунку, а також спрощує адаптацію інтерфейсу до змін контексту виконання. Така реалізація надає змогу програмно змінювати структуру вікон, оперативно адаптувати елементи керування до потреб користувача та розширювати функціональність без порушення цілісності інтерфейсної архітектури.

У якості головної іконки застосунку (його візуального символу) обрано стилізоване зображення, що асоціюється зі стимуляцією фосфенів. Такий вибір є не лише візуально привабливим, а й концептуально точним – він чітко відображає зміст і спрямованість розробленого додатку.



Рисунок 4.3 – Іконка додатку

GUI включає два основні вікна: головне вікно та діалогове вікно налаштувань. Така структура є зручною як з точки зору UX, так і в контексті підтримки модульної архітектури. Розподіл функціоналу між двома вікнами дозволяє розмежувати базову взаємодію з додатком та розширені можливості конфігурації, що, своєю чергою, підвищує інтуїтивність використання та загальну гнучкість системи.

Головне вікно (клас `MainWindowUI`) виконує роль центральної платформи для роботи користувача з додатком. Тут відбувається завантаження зображень або відео, запуск алгоритмів моделювання фосфенної стимуляції, перегляд результатів та зміна базових параметрів обробки. Основні елементи інтерфейсу формуються за допомогою таких об'єктів бібліотеки Qt:

- `QGraphicsView` (області відображення вхідного та вихідного кадру);
- `QPushButton` (кнопки для завантаження файлів і запуску симуляції);
- `QSpinBox` (поля для регулювання ключових параметрів обробки).

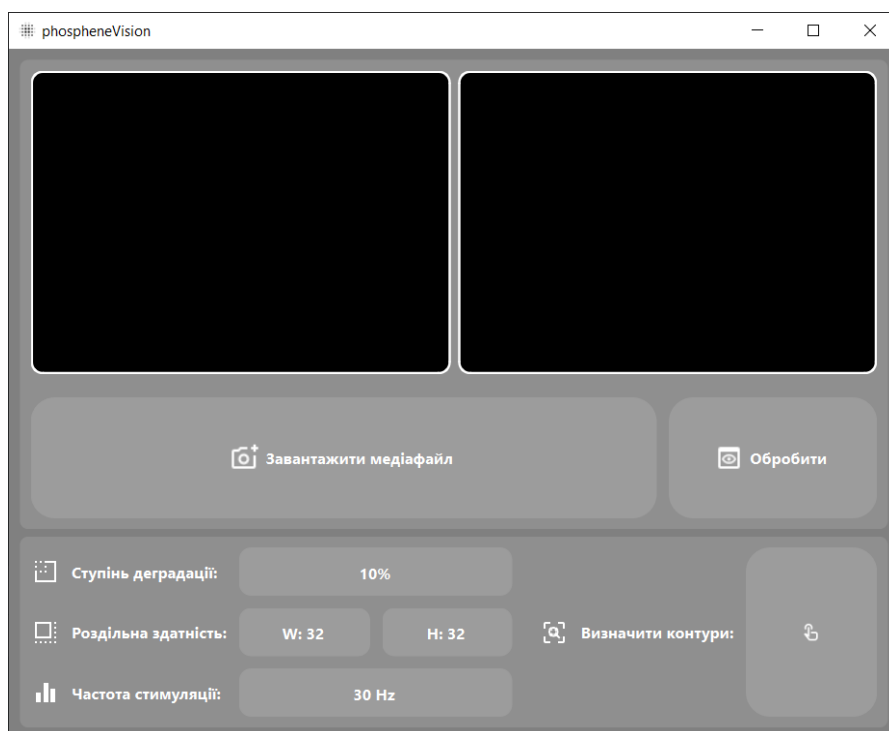


Рисунок 4.4 – Вигляд головного вікна додатку

Діалогове вікно (клас `DialogUI`) забезпечує доступ до розширених можливостей конфігурації, даючи змогу детально налаштувати параметри попередньої обробки вхідного зображення. Зокрема, надаються слайдери для регулювання рівня розмиття, порогів визначення контурів, сили морфологічних операцій (дилатації, ерозії). До складу інтерфейсу цього вікна входять такі Qt-компоненти, як:

- `QGraphicsView` (область відображення оброблених контурів);
- `QSlider` (повзунки для визначення параметрів обробки);
- `QPushButton` (кнопки для скидання або застосування змін).



Рисунок 4.5 – Вигляд діалогового вікна додатку

Обидва класи вікон реалізують ключові методи: `setup_UI` та `retranslate_UI`. Перший приймає відповідний віконний об'єкт та відповідає за програмне створення й розміщення всіх елементів інтерфейсу, а другий виконує локалізацію, забезпечуючи гнучку зміну мовних налаштувань інтерфейсу без потреби в його перезапуску.

Стилізація базується на мові QSS (Qt Style Sheets), яка, по суті, є Qt-специфічною версією CSS. Вона підтримує багато тих же властивостей, але має специфічні розширення, що враховують особливості компонентів бібліотеки.

Зокрема, особливе оформлення реалізовано для кнопок QPushButton (лістинг 4.17).

Лістинг 4.17 – Налаштування вигляду кнопок

```
QPushButton {
    height: 100px;
    border-radius: 20px;
    background-color: rgba(255, 255, 255, 30);
}
QPushButton::hover {
    background-color: rgba(255, 255, 255, 80);
}
QPushButton::pressed {
    background-color: rgba(255, 255, 255, 20);
}
```

Аналогічним чином стилізуються повзунки QSlider (лістинг 4.18), для яких визначено елементи groove (доріжка) та handle (рукоятка).

Лістинг 4.18 – Налаштування вигляду повзунків

```
QSlider {
    background-color: none;
}
QSlider::groove {
    border-radius: 10px;
    background-color: rgba(255, 255, 255, 30);
}
QSlider::handle {
    width: 24px;
    height: 24px;
    border-radius: 10px;
    background-color: rgba(255, 255, 255, 30);
}
QSlider::handle:hover {
    background-color: rgba(255, 255, 255, 80);
}
QSlider::handle:pressed {
    background-color: rgba(255, 255, 255, 20);
}
```

Ефекти наведення та натискання реалізовані на основі прозорості віджетів за допомогою спеціальних псевдоелементів – `:hover` та `:pressed` відповідно. Так при переведенні курсора фоновий колір змінюється на більш яскравий та контрастний, що візуально сигналізує користувачу про активність цього елемента та готовність до взаємодії. Тоді як при натисканні колір фону змінюється на приглушений або темний відтінок, що створює відчуття натискання фізичної кнопки (або рукоятки). Такий механізм забезпечує інтуїтивний зворотний зв'язок, підвищує зручність користування і робить взаємодію більш наочною та природною.

Значна увага приділена використанню іконографіки як засобу підвищення інтуїтивності взаємодії – всі функціональні елементи супроводжуються піктограмами, що полегшують сприйняття і прискорюють орієнтацію в інтерфейсі. Всі вони витримані в єдиному візуальному стилі, що забезпечує естетичну цілісність і підвищує зручність сприйняття GUI. Графічні елементи запозичені з бібліотеки Google Fonts [16], що гарантує їхню якість і відповідність сучасним дизайнерським стандартам.

Структура також передбачає організацію віджетів у вертикальні, горизонтальні та сіткові макети, що забезпечує логічне групування елементів і компактність їх розташування. Така архітектура дозволяє ефективно використовувати простір вікна та зберігати чітку ієрархію між елементами.

Отже, інтерфейс побудовано з акцентом на візуальну зрозумілість і зручність. Завдяки чіткому розподілу обов'язків модуль GUI.py забезпечує чисту, модульну та легко підтримувану реалізацію графічного UI, що дозволяє безпечно масштабувати або модифікувати його без ризику порушення основної логіки, реалізованої в інших частинах програми.

4.1.4 Демонстрація результатів

При першому запуску додатку користувач потрапляє у головне вікно інтерфейсу, де може завантажити відеофайл для подальшої обробки. Для прикладу було використано відео з роздільністю 1920×1080 пікселів (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Відео у медіаплеєрі

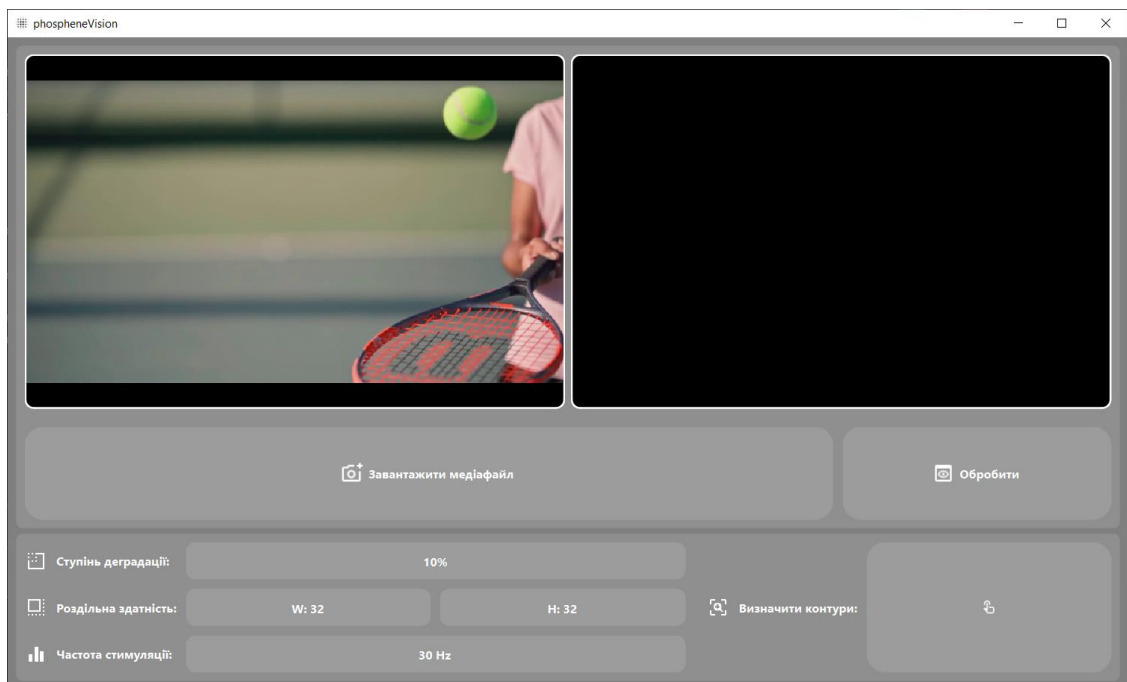


Рисунок 4.7 – Головне вікно програми після завантаження відео

Після завантаження відеофайлу користувач одразу отримує можливість ініціювати його обробку (рисунок 4.7). Подальша візуалізація ґрунтується на результатах попередньої обробки: активуються лише ті фосфени, координати яких збігаються з виявленими на зображенні контурами.

У випадку, якщо згенероване зображення є недостатньо інформативним або користувачеві важко розпізнати окремі об'єкти сцени, передбачена можливість ручного налаштування параметрів передобробки. Для цього слід скористатися відповідною кнопкою в інтерфейсі, що відкриває діалогове вікно параметрів (рисунок 4.8). У даному режимі користувач може або скоригувати автоматичне виявлення контурів, або виконати всю процедуру заново – шляхом регулювання відповідних повзунків для порогів фільтрації зображення.



Рисунок 4.8 – Режим ручного визначення контурів

Головною функцією розробленої програми є моделювання фосфенного представлення зорового образу. На основі параметрів оригінального зображення формується випадкова фосфенна мапа, що імітує індивідуальну ретинотопію.

При цьому користувач має змогу налаштувати низку критичних параметрів моделювання, що не залежать від попередньої обробки. Зокрема, передбачена можливість встановлення ступеня деградації ретинотопічної мапи (імітуючи втрату частини фосфенів), вибору роздільної здатності чипу, а також задання частоти стимуляції, що безпосередньо впливає на динаміку оновлення фосфенного зображення.

Таке результуюче представлення є умовним, проте інформативним, зображенням того, як зорову сцену міг би сприймати користувач візуального нейроінтерфейсу за умов електричної стимуляції зорової кори.

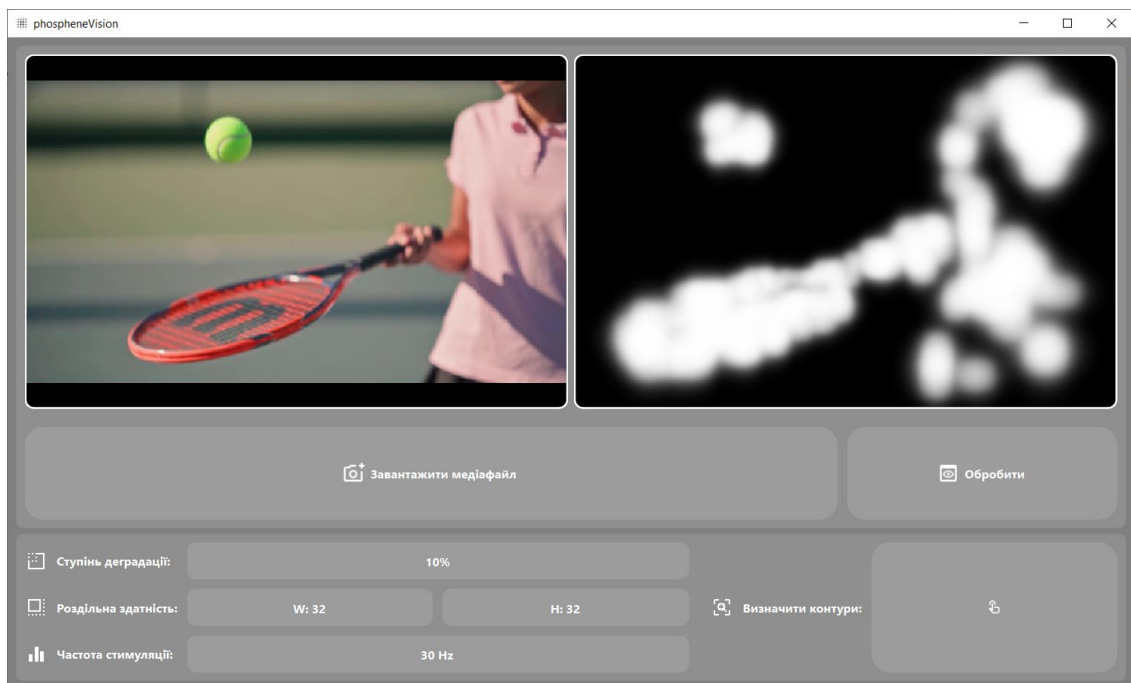


Рисунок 4.9 – Порівняння оригінального та фосфенного представлень

Таким чином, інтуїтивна структура керування, поєднання автоматичних та ручних режимів обробки, а також наочне представлення результатів дозволяють ефективно використовувати програму як у навчальних, так і в дослідницьких цілях.

ВИСНОВКИ

У результаті роботи була розроблена комп'ютерна система симуляції зору, що інтегрує науково обґрунтовані алгоритми обробки та візуалізації з сучасними програмними технологіями й інтуїтивно зрозумілим GUI.

Додаток моделює фосфенне зорове сприйняття з урахуванням біологічних особливостей, дозволяючи досліджувати механізми кортикальної стимуляції для формування абстрактних візуальних образів. Водночас це є спрощена модель, що не включає електрофізіологічні аспекти реального впливу. Поточна реалізація використовує випадкове розташування фосфенів, що дозволяє відтворювати базові механізми візуального сприйняття. Однак за наявності індивідуальної карти ретинотопії, отриманої медичними шляхами, алгоритм можна адаптувати для завантаження таких даних. Це відкриває перспективи для подальшої інтеграції з клінічними практиками.

КС підтримує роботу не лише зі статичними зображеннями, а й із відеопотоками в реальному часі, що суттєво розширює можливості її практичного застосування. Гнучкість налаштувань і можливість оперативної адаптації інтерфейсу до різних сценаріїв використання роблять програму цікавою як для фахівців, так і для інших зацікавлених користувачів. Завдяки модульній архітектурі та чіткому розподілу функціональності, програмне забезпечення легко піддається масштабуванню та подальшій модифікації, що відкриває перспективи для розширення функціоналу.

Отже, розроблений застосунок виступає надійною платформою для експериментального моделювання та аналізу зорових функцій, яка може стати важливим інструментом у розвитку біомедичних технологій, спрямованих на покращення якості життя людей із порушеннями зору.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Man D., Olchawa R. The Possibilities of Using BCI Technology in Biomedical Engineering. *Biomedical Engineering and Neuroscience* : Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Brain-Computer Interfaces, Opole, Poland, March 13–14, 2018 (Advances in Intelligent Systems and Computing). Cham : Springer, 2018. Vol. 720. P. 30–37. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-75025-5_4.
2. World report on vision. Geneva : World Health Organization, 2019. 180 p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516570>.
3. Зделова Г. С. Офтальмологічна допомога в Україні. Стан та перспективи удосконалення (огляд літератури). *Клінічна та профілактична медицина*. 2023. Т. 1, № 23. С. 78–85. DOI: [https://doi.org/10.31612/2616-4868.1\(23\).2023.11](https://doi.org/10.31612/2616-4868.1(23).2023.11).
4. Thaler L., Goodale M. A. Echolocation in humans: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*. 2016. Vol. 7, no. 6. P. 382–393. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcs.1408>.
5. Hubel D. H., Wiesel T. N. Brain Mechanisms of Vision. *Scientific American*. 1979. Vol. 241, no. 3. P. 150–163. DOI: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0979-150>.
6. Wang H. Z., Wong Y. T. A novel simulation paradigm utilizing MRI-derived phosphene maps for cortical prosthetic vision. *Journal of Neural Engineering*. 2023. Vol. 20, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aceca2>.
7. Chen S. C. et al. Simulating prosthetic vision: I. Visual models of phosphenes. *Vision Research*. 2009. Vol. 49, no. 12. P. 1493–1506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.02.003>.
8. Fernández E. et al. Visual percepts evoked with an intracortical 96-channel microelectrode array inserted in human occipital cortex. *Journal of Clinical Investigation*. 2021. Vol. 131, no. 23.

DOI: <https://doi.org/10.1172/jci151331>.

9. Grani F. et al. Time stability and connectivity analysis with an intracortical 96-channel microelectrode array inserted in human visual cortex. *Journal of Neural Engineering*. 2022. Vol. 19, no. 4.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac801d>.

10. Янакаєв А. А., Єрошенко О. А. Система симуляції зору. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : тези доп. учасників XV Міжнар. наук.-техн. конф., м. Баку–Харків–Жиліна, 24–25 квіт. 2025 р. Харків : Impress, 2025. Т. 2. С. 11.

DOI: <https://doi.org/10.32620/ICT.25.t2>.

11. Rossum G. v., Team P. D. Python Tutorial: Release 3.7.0. 12th Media Services, 2018. 149 p. URL: https://bugs.python.org/file47781/Tutorial_EDIT.pdf.

12. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. PAMI-8, no. 6. P. 679–698. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpami.1986.4767851>.

13. Willman J. M. Beginning PyQt: A Hands-on Approach to GUI Programming. 1st ed. Hampton : Apress, 2020. 440 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5857-6>.

14. The Qt Company Ltd. Signals & Slots. *Qt Group Documentation*. URL: <https://doc.qt.io/qt-6/signalsandslots.html>.

15. Dawson-Howe K. A practical introduction to computer vision with OpenCV. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2014. 217 p.

16. The Google LLC. Material Symbols & Icons. *Google Fonts*. URL: <https://fonts.google.com/icons>.