

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-21>

УДК 004.9

ВОЙЧУР Юрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3085-7315>

e-mail: voichury@khmnhu.edu.ua

СОРОХАН Владислав

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0002-0645-6503>

e-mail: sorokhan@gmail.com

ВОЙЧУР Олег

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8503-6464>

e-mail: ovoichur@gmail.com

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА «РОЗУМНА ЧАШКА» ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ

Дана стаття присвячена обґрунтуванню та проектуванню кіберфізичної системи «Розумна чашка», розробленої для підвищення рівня автономії та безпеки людей із вадами зору в процесі приготування та споживання напоїв. У роботі проаналізовано сучасний стан проблеми, що характеризується стрімким зростанням кількості осіб із порушеннями зору в глобальному масштабі. Авторами детально розглянуто нейрофізіологічні засади компенсації втрачених функцій зору через механізми крос-модальної пластичності головного мозку, де провідну роль починають відігравати слуховий та тактильний аналізатори. Встановлено, що здатність мозку до реорганізації та перепрограмування візуальних зон кори для обробки сигналів від інших органів чуття створює фундаментальну базу для впровадження високотехнологічних асистивних рішень. У статті представлено критичний огляд існуючих аналогів і доведено, що більшість із них мають обмежений функціонал, зосереджений лише на інформаційних сповіщеннях. На відміну від відомих засобів, запропонована кіберфізична система базується на інтеграції дев'яти взаємопов'язаних підсистем, що забезпечують комплексний контроль процесу. Ключовою науковою новизною розробки є концептуалізація мультимодального інтерфейсу «Zero-Visual UI», який вперше поєднує динамічну тактильну індикацію зміни текстури корпусу із голосовим супроводом у межах єдиного пристрою. Архітектура системи побудована на трирівневій ієрархії, що включає фізичний рівень з мережею датчиків рівня рідини, температури, ваги, тиску та мутності рідини, середній рівень на базі енергоефективного контролера ESP32 та верхній кібернетичний рівень у вигляді спеціалізованого мобільного застосунку. Особливу увагу приділено інтелектуальному контуру безпеки, який реалізує автоматичне блокування питного клапана при виявленні небезпечного тиску пари, та підсистемі гігієнічного контролю, що використовує оптичні сенсори мутності для верифікації чистоти чашки. У підсумку розроблена концепція перетворює простий побутовий пристрій на складну інтелектуальну систему, яка забезпечує незрячим людям повну безпеку від опіків, точність дозування інгредієнтів та впевненість у щоденних справах, сприяючи розвитку інклюзивного середовища та покращенню якості життя.

Ключові слова: кіберфізична система, «Розумна чашка», люди з вадами зору, інтерфейс Zero-Visual UI, асистивні технології, мікроконтролер ESP32, датчики, мобільний застосунок.

VOICHUR Yurii, SOROKHAN Vladyslav, VOICHUR Oleg
Khmelnyskyi National University

CYBERPHYSICAL SYSTEM “SMART CUP” FOR PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS

This article is devoted to the justification and design of an innovative cyber-physical system “Smart Cup,” specially developed to increase the autonomy and safety of visually impaired people in the process of preparing and consuming beverages. The paper analyzes the current state of the problem, which is characterized by a rapid increase in the number of people with visual impairments on a global scale, which is projected to reach 703 million people by 2050. The authors examine in detail the neurophysiological basis for compensating for lost visual functions through the mechanisms of cross-modal plasticity of the brain, where auditory and tactile analyzers begin to play a leading role. It has been established that the brain's ability to reorganize and reprogram visual areas of the cortex to process signals from other senses creates a fundamental basis for the implementation of high-tech assistive solutions. The article presents a critical review of existing analogues, such as liquid level indicators, as well as various “smart” assistive technologies, and proves that most of them have limited functionality, focused only on information notifications. Unlike known means, the proposed cyber-physical system is based on the integration of nine interconnected subsystems that provide comprehensive process control. The key scientific novelty of the development is the conceptualization of the multimodal interface “Zero-Visual UI,” which for the first time combines dynamic tactile indication of changes in the texture of the body with voice accompaniment within a single device. The system architecture is based on a three-level hierarchy, which includes a physical level with a network of sensors for liquid level, temperature, weight, pressure, and turbidity, a middle level based on an energy-efficient ESP32 controller, and an upper cybernetic level in the form of a specialized mobile application. Particular attention is paid to the intelligent safety circuit, which automatically locks the drinking valve when dangerous steam pressure is detected, and the hygiene control subsystem, which uses optical turbidity sensors to verify the cleanliness of the cup. As a result, the developed concept transforms a simple household device into a complex intelligent system that provides blind people with complete protection from burns, accurate ingredient dosing, and confidence in their daily activities, contributing to the development of an inclusive environment and improving quality of life.

Keywords: cyber-physical system, “Smart Cup”, visually impaired people, Zero-Visual UI interface, assistive technologies, ESP32 microcontroller, sensors, mobile application.

Стаття надійшла до редакції / Received 10.10.2025
Прийнята до друку / Accepted 14.12.2026
Опубліковано / Published 05.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Войчур Юрій, Сорохан Владислав, Войчур Олег

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Зір є ключовим джерелом інформації для людини, адже саме через зорові рецептори до мозку надходить понад 90% даних про навколишній світ [1]. Процес сприйняття є складним і багатоетапним – він стартує з проєктування зображення на сітківку, переходить у фазу збудження фоторецепторів та передачі сигналів через нейронні мережі, а завершується в корі головного мозку, де і формується кінцевий зоровий образ.

На жаль, нерідко люди частково або повністю втрачають здатність бачити через травми, інфекційні захворювання, як-от бленорея чи сифіліс, або внаслідок ушкоджень зорових нервів і головного мозку. У сучасному світі також спостерігається тенденція до зростання випадків сліпоти, спричиненої віковими змінами та ускладненнями від неконтрольованого цукрового діабету.

Глобальна статистика свідчить про стрімке погіршення ситуації: якщо у 2015 році налічувалося 253 мільйони людей з вадами зору, в т. ч. 36 мільйонів сліпих людей і 217 мільйонів з вадами зору середнього та високого ступеня [1], то до 2020 року цей показник зріс до 295 мільйонів, в т. ч. 43,3 мільйона сліпих людей і 251,7 мільйонів з вадами зору середнього та високого ступеня [2], а за прогнозами до 2050 року кількість незрячих або осіб із серйозними порушеннями зору може сягнути 703 мільйонів [2] – Рис. 1. В Україні офіційно зареєстровано близько 70 тисяч незрячих, проте неофіційні дані вказують на те, що реальна чисельність таких людей може бути втричі більшою.

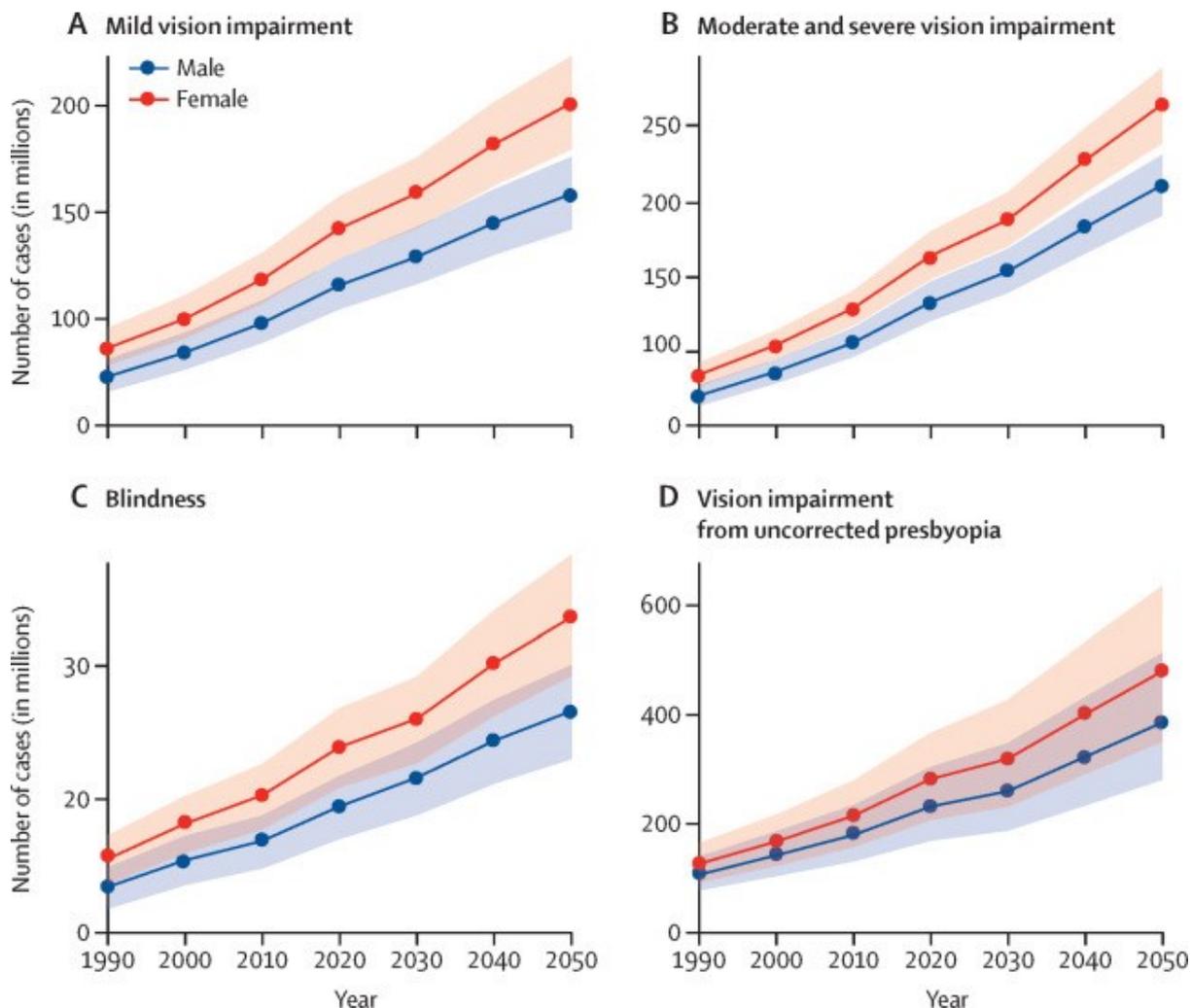


Рис. 1. Прогноз кількості людей, які страждають на легкі вади зору (А), помірні та важкі вади зору (В), сліпоту (С) та вади зору внаслідок некоригованої пресбіопії (D), за віком та статтю, 1990–2050 рр. [2]

Для забезпечення комунікації та навчання люди з порушеннями зору застосовують унікальне рельєфно-крапкове письмо, створене у 1824 році французьким педагогом Луї Брайлем [3]. Система базується на використанні шести точок, розміщених у два вертикальні стовпчики, комбінації яких дозволяють кодувати літери та символи. Технічний процес створення такого тексту має свої особливості: оскільки читання здійснюється шляхом дотику до опуклих точок, запис проводиться зі зворотного боку аркуша методом проколювання, що вимагає написання тексту справа наліво у дзеркальному відображенні. Після завершення роботи сторінка перегортається, і читач сприймає інформацію у звичному напрямку зліва направо.

Сьогодні у світі, зокрема в країнах Європейського Союзу, Північної Америки та Японії, активно розбудовується інклюзивний інформаційний простір Брайля. Це передбачає не лише масове видання книг та виготовлення тактильних інформаційних табличок, а й впровадження спеціалізованих електронних пристроїв. Окрім того, шрифт Брайля став обов'язковим елементом маркування споживчих товарів, етикеток та кнопок у ліфтах, що значно полегшує повсякденну орієнтацію та самостійність незрячих людей [4].

Актуальність розробки кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей із порушеннями зору обумовлена стрімким зростанням кількості осіб із вадами зору у усьому світі та необхідністю створення ефективних засобів їхньої соціальної та побутової адаптації. Побутове травмування, зокрема опіки гарячою водою через неможливість візуального контролю наповнення ємності, є однією з найпоширеніших проблем незрячих. Кіберфізична система «Розумна чашка» дозволить автоматизувати цей процес, мінімізуючи ризики. Створення таких смарт-об'єктів доповнює існуючу інфраструктуру (як-от шрифти Брайля чи звукові маячки), роблячи життєве середовище людини з вадами зору більш передбачуваним та контрольованим.

Розглянемо відомі аналоги кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей із порушеннями зору. RNIB Liquid Level Indicator – компактний пристрій від Королівського національного інституту сліпих (Великобританія), який кріпиться на край чашки та використовує три металеві щупи для визначення двох рівнів рідини (наприклад, для кави та окремо для молока), подає звукові та вібраційні сигнали, щоб повідомити, коли потрібно припинити наливання; індикатор рівня рідини можна використовувати на більшості чашок та кухлів, а також на склянках, глечиках та каструлях; пристрій «боїться» занурення у воду; вартість близько 1200 грн [5].

2-Stage Liquid Level Indicator (LS&S) – аналогічний пристрій, який використовує переривчастий звуковий сигнал при наближенні до краю та безперервний – коли ємність повна; він має три зубці, які утримують його над краєм склянки або чашки, а потім виявляє рідину на двох різних рівнях для людей зі слабким зором та незрячих; вартість близько 600 грн [6].

DK205 Liquid Level Indicator – компактний, легкий пристрій, який має три металеві зонди, які показують два окремі рівні рідини в чашці або кухлі; індикатор рівня рідини вібрує та подає звуковий сигнал, повідомляючи, коли потрібно припинити наливання; перший звуковий та вібраційний сигнал повідомляє, коли потрібно припинити доливання гарячої води, якщо людина також хоче додати молоко; другий сигнал повідомляє, коли чашка майже повна; вартість близько 1000 грн [7].

Стаття [8] описує використання датчиків Liquid Level як критично важливих елементів навичок щоденного життя. У роботі підкреслюється, що такі сенсори спеціально розроблені для моніторингу рівня гарячих/холодних рідин та перетворення фізичного параметра (рівня) у тактильний або звуковий відгук.

Основна ідея проекту [9] полягає в розробці окулярів на базі Raspberry Pi для незрячих людей. Цифрова камера записує відео, яке аналізується програмою, написаною мовою Python, з використанням функцій виявлення об'єктів. Програма виявляє безліч об'єктів перед цільовою людиною та надсилає дані на Raspberry Pi, включаючи назву об'єкта та відстань до нього. Це викликає голосове повідомлення із зазначенням назви об'єкта та відстані. Також мікрофон використовується для отримання команд від користувача та надсилання цих команд на Raspberry Pi для виконання цієї дії.

Метою статті [10] є розробка інноваційного мікропроцесорного сенсорного скла для людей з вадами зору, яке може допомогти незрячим людям, видаючи звуковий сигнал під час виявлення об'єкта. Запропоноване направляюче скло надає всю необхідну інформацію для вух незрячої людини у вигляді аудіоінструкцій. Запропонована система базується на Raspberry Pi 3 моделі В, камері Pi та модулі глобальної системи позиціонування (GPS) NEO-6М. Автори використовують TensorFlow та швидший підхід на основі згорткової нейронної мережі (R-CNN) для виявлення об'єктів та розпізнавання членів сім'ї незрячої людини. Ця система надає голосову інформацію через навушники та допомагає незрячій людині отримати незалежність та свободу в приміщенні та на вулиці.

Дослідницька робота [11] зосереджена на розробці системи навігації, яка використовує розумні окуляри в поєднанні з датчиком для постійного захоплення зображень з навколишнього середовища за допомогою носимих розумних окулярів. Розумні окуляри оснащені процесором для обробки захоплених зображень, і об'єкти будуть виявлені, щоб повідомити користувача про результати зображення, і користувач матиме набагато повніше уявлення. Ця система дозволяє людям з вадами зору не лише інформувати про маршрут подорожі та відстань до перешкоди, але й може повідомити про те, що це за перешкода. Ці розумні окуляри можуть визначати відстань до перешкоди та видавати попередження, щоб заздалегідь попередити користувача.

У статті [12] дослідники розробили «Розумну тростину» для незрячих людей. За допомогою цієї «Розумної тростини» незрячі та слабозорі люди зможуть виконувати щоденні завдання з більшою мобільністю та незалежністю. Запропонований проєкт передбачає створення легкої тростини з кількома датчиками, для керування якими використовуватиметься Arduino. Датчики використовуються для передачі сигналів на закодовану плату Arduino. Потім ця плата підключається до сигнального пристрою з вібраторами та сиренами, а також деякими голосовими кліпами, записаними для безпечного керування незрячими. Тростина також має звуковий роз'єм, якого немає в більшості звичайних тростин. Він використовується для керування допоміжними частинами, які повідомляють користувача про матеріал, форму та напрямок перешкоди. «Розумна тростина» працює від батареї та є легкою. Таким чином, це зручний у використанні та доступний за ціною варіант для людей з вадами зору.

У статті [13] обговорюється пристрій «Розумна кепка» як недорогий помічник на основі датчиків для сліпих та слабозорих людей, який використовує ультразвукові датчики для виявлення об'єктів навколо та інформує користувача про наближення або нерухомі об'єкти навколо нього за допомогою вібраційних приводів. Він дуже дешевий порівняно з іншими альтернативами та має високу інтеграцію з іншими запропонованими ідеями.

У статті [14] представлено проєкт та розробку допоміжного пристрою, який допомагає людям з вадами зору безпечніше поводитися з гарячими рідинами. У запропонованій системі розроблено підставку для чашок, яка вимірює рівень води та температуру за допомогою різних датчиків. Прототип чашки було розроблено за допомогою CAD та надруковано для подальшого тестування. Команда успішно розробила робочий прототип, який визначає рівень води за допомогою тиску і попереджає користувача, коли вода занадто гаряча. У майбутньому будуть проведені додаткові випробування, щоб можна було використовувати різні типи чашок на підставці для чашок.

У статті [15] пропонується екосистема інтелектуальних об'єктів для домашнього моніторингу пацієнтів, які перенесли інсульт. Першим елементом цієї екосистеми є розумна чашка, призначена для моніторингу рухової активності рук і кистей пацієнтів. Ця чашка оснащена датчиками, які аналізують, як пацієнти поведуться з чашкою, надаючи важливу інформацію про хід їхнього одужання. Крім того, вона виявляє тремор, що вказує на можливі неврологічні або рухові розлади, і відстежує щоденні дії, такі як сидіння, стояння, ходьба та пиття. Ці дані є необхідними для всебічної оцінки самостійності та прогресу пацієнтів.

У науковій роботі [16] описано конструкцію пристрою, який може допомогти літнім людям або людям з фізичними чи когнітивними обмеженнями вчасно приймати призначені ліки у формі таблеток, одночасно перевіряючи, чи такі таблетки були фактично спожиті. Конструкція складається з портативного розумного дозатора таблеток, який встановлюється на підставку, що дозволяє йому видавати таблетки в розумну чашку. Розумний дозатор таблеток використовує кроковий двигун для обертання до потрібних таблеток на основі конкретного часового проміжку/дня тижня. Розумна чашка, прикріплена до пігулкової коробки, використовує акселерометр, гіроскоп та інфрачервоний датчик наближення, щоб визначити, чи приймає користувач ліки, за тим, наскільки розумна чашка піднята та нахилена. Розумна чашка повідомляє розумний дозатор пігулок, чи пігулки були прийняті належним чином, чи ні, що дозволяє пристрою потенційно допомогти пацієнтам вести більш здоровий спосіб життя.

Таким чином, створення кіберфізичної системи «Розумна чашка» відповідає сучасним тенденціям розвитку інклюзивного суспільства та використовує фундаментальний адаптивний потенціал людського мозку для підвищення якості життя людей з вадами зору. Огляд відомих рішень підтверджує, що хоча ринок пропонує прості накладні датчики та різні розумні пристрої для людей з вадами зору, створення саме цілісної кіберфізичної системи (де чашка є інтегрованим пристроєм з аналітикою даних) є актуальним науковим завданням. Більшість існуючих розробок фокусуються на інформаційній складовій (сповіщення), тоді як розроблювана кіберфізична система дозволить вийти на рівень управління та інтеграції (наприклад, взаємодія з смартфоном).

Нейрофізіологія сенсорних процесів та засоби компенсації зорової недостатності в людей з вадами зору

Розглянемо основи нейрофізіології сенсорних процесів та засоби компенсації зорової недостатності в людей з вадами зору.

Особливістю нейрофізіології зрячих людей є те, що в корі їхнього головного мозку зони, відповідальні за обробку візуальних сигналів, мають значно більшу кількість нейронів порівняно з ділянками, що опрацьовують слухові чи тактильні дані. Саме це зумовлює домінуючу роль очей у процесі аналізу навколишнього середовища, проте у випадку втрати зору відповідний відділ кори припиняє отримувати звичні вхідні сигнали [17].

Тривала відсутність зорового сприйняття запускає глибокі адаптивні процеси, що відображаються на морфологічній структурі окремих ділянок мозку та призводять до повної перебудови системи отримання інформації через збережені органи чуття. Такі зміни відбуваються безпосередньо протягом життя, коли в

процесі розвитку в незрячих формуються принципово нові способи сприйняття та аналізу дійсності, а також специфічні методи орієнтування у просторі, які згодом починають відігравати провідну роль у їхній пізнавальній діяльності.

Порівняльна характеристика змін чутливості слуху та дотику у незрячих людей демонструє дивовижну здатність мозку до адаптації. Оскільки ці органи чуття стають основними каналами зв'язку зі світом, вони зазнають як фізіологічних, так і функціональних трансформацій.

У незрячих людей слух не стає «гострішим» у фізичному сенсі (порог чутності децибелів зазвичай такий самий, як у зрячих), проте мозок починає набагато ефективніше обробляти звукову інформацію. Так, незрячі значно швидше та точніше визначають джерело звуку в просторі, особливо в умовах шуму або при відлунні. Багато людей з вадами зору розвивають здатність до ехолокації – розпізнавання об'єктів за відлунням від власних кроків або клацання язиком. Мозок незрячих швидше розпізнає людську мову, що дозволяє їм сприймати аудіокниги на швидкості, яка для зрячих звучить як нерозбірливий шум [18, 19].

Дотик для людей з вадами зору стає основним інструментом для «бачення» предметів зблизька та читання. Тут зміни відбуваються на рівні сенсомоторної кори. Так, здатність розрізнити дві близькі точки на шкірі у незрячих розвинена значно краще. Це критично важливо для читання шрифтом Брайля, де відстань між крапками мінімальна. Нервові закінчення на пучках пальців передають сигнали до мозку, який інтерпретує їх миттєво. Цікаво, що при читанні Брайля у незрячих активується потилична частка мозку (яка у зрячих відповідає за зір). Незрячі часто тонше відчувають зміну потоків повітря або легку вібрацію підлоги, що допомагає в орієнтуванні [18, 19].

Ці зміни є класичним прикладом крос-модальної пластичності: мозок не залишає «порожніми» зони, що призначалися для зору, а віддає їх під потреби слуху та дотику, роблячи ці відчуття значно інформативнішими [18, 19].

Результати порівняльного аналізу змін чутливості слуху та дотику у незрячих людей представлені у Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз змін чутливості слуху та дотику у незрячих людей

Характеристика	Слух	Дотик
Основна функція	Орієнтування на далеких відстанях, ехолокація	Детальне вивчення предметів, читання, маніпуляції
Механізм покращення	Швидкість обробки звукових сигналів мозком	Розширення зони представлення пальців у корі мозку
Здатність до навчання	Потребує практики аналізу відлуння	Потребує тривалого тренування дрібної моторики
Роль у пізнанні	Створення «акустичної карти» середовища	Створення просторових образів через контакт

Особливості мислення та нейрофізіології незрячих людей безпосередньо залежать від віку, у якому було втрачено зір. Якщо це сталося у свідомому віці, людина продовжує оперувати тими ж візуальними образами, що й зрячі, хоча тепер отримує дані про них через інші органи чуття. У тих, хто втратив зір після п'яти років, зорова пам'ять залишається слабо розвиненою, а сприйняття світу базується переважно на слухових та тактильних відчуттях. У випадках втрати зору в ранньому дитинстві мозок демонструє високу пластичність – центр, що зазвичай відповідає за візуальну інформацію, переорієнтовується на обробку вербальних, слухових або дотикових сигналів. Проте у людей, сліпих від народження, ділянка мозку, призначена для побудови візуальних зображень, взагалі не функціонує за прямим призначенням [18, 19].

Результати томографічних досліджень підтверджують ці відмінності, демонструючи у незрячих значне посилення нейронних зв'язків між різними відділами мозку. У сліпих людей спостерігалися посилені зв'язки між деякими частинами мозку. Суттєві структурні зміни фіксуються не лише у потиличній корі, а й у зонах, відповідальних за функціонування мови, пам'яті та сенсомоторних реакцій, що свідчить про глибоку адаптацію всієї нервової системи [19].

Наукові дослідження в галузі нейропластичності підтверджують, що незрячість спричиняє глибоку адаптацію мозку, змінюючи самі принципи обробки вхідної інформації. Завдяки здатності нейронних структур до реорганізації, мозок здатний «перепрограмувати» ділянки, які зазвичай відповідають за зір, для посилення чутливості інших сенсорних систем, зокрема слуху та дотику. Хоча розмір візуальних зон у мозку незрячих людей залишається порівняним із показниками зрячих, їхні невізуальні зони часто перевищують норму, що свідчить про компенсаторне розширення функціональних можливостей. Численні докази вказують на те, що за відсутності сигналів від одного з органів чуття мозок активно самостійно переналаштовується, щоб максимально ефективно використовувати нюх, слух чи тактильні відчуття для взаємодії із зовнішнім світом. Навіть у випадках повної втрати зору організм демонструє колосальний адаптивний потенціал, «перекроюючи» свою структуру таким чином, щоб якнайкраще оперувати доступними даними та забезпечувати повноцінну життєдіяльність людини в навколишньому середовищі [17].

Описане явище отримало назву компенсації, що полягає у відновленні або заміщенні недорозвинених чи порушених психічних функцій через використання збережених можливостей організму або перебудову частково ушкоджених систем. З фізіологічного погляду основою цього процесу є мобілізація значних резервів вищої нервової діяльності, коли втрачена функція зору компенсується активізацією слухового, рухового та тактильного аналізаторів. Зокрема, у дітей, незрячих від народження, компенсація відбувається переважно шляхом інтенсивного розвитку дотику, що класифікується як внутрішньосистемна перебудова, де адаптація здійснюється за допомогою механізмів тієї ж сенсорної системи. Фізіологічний механізм такого пристосування базується на стабільній роботі збережених систем та загальній рефлекторній діяльності організму. Важливо, що запуск компенсаторних процесів відбувається автоматично на рівні безумовних рефлексів, тоді як подальше вдосконалення цих адаптаційних навичок і механізмів реалізується вже як складна умовно-рефлекторна діяльність [18, 20].

Отже, візуальні зони кори головного мозку реорганізуються для обробки сигналів від інших аналізаторів, зокрема тактильного та слухового. Саме цей механізм компенсації стає основою для використання кіберфізичних систем – вони трансформують візуальні параметри навколишнього середовища (наприклад, рівень рідини, її температуру або наявність перешкод) у доступні для сприйняття сигнали. Оскільки мозок незрячої людини «перепрограмує» себе на посилену обробку невізуальних сигналів, пристрій, що надає звуковий або вібраційний зворотний зв'язок, ідеально інтегрується у нову когнітивну модель сприйняття користувача. Це створює нагальну потребу у впровадженні асистивних технологій для виконання повсякденних життєвих завдань, які б базувалися на сучасних знаннях про нейрофізіологію та механізми компенсації втрачених функцій та покращували б функціонування та виконання повсякденних навичок, тим самим покращуючи самостійне життя людей з вадами зору.

Тому, головною метою даного дослідження є проектування кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору.

Кіберфізична система «Розумна чашка» для людей з вадами зору

Головні проблеми, з якими стикається сліпа людина при приготуванні та споживанні кави, можна розділити на кілька категорій: безпека (гаряча вода і посуд становлять значний ризик опіків; без можливості бачити, як і куди ллється вода, легко пролити її на себе або перелити через край), точність і навігація (важко відміряти правильну кількість кави, цукру або молока; відсутність візуальних орієнтирів робить майже неможливим наповнення чашки до потрібного рівня, що часто призводить до переливання або недостатнього об'єму), а також чуттєві перешкоди (без зору важко визначити температуру напою; сліпа людина може легко обпектися, не відчувши тепла на відстані, або навпаки, пити каву, яка вже охолола; до того ж, використання традиційного посуду, як-от чашок з ручкою, може бути незручним, оскільки її положення відносно отвору для пиття не завжди очевидне).

Розроблювана «Розумна чашка» спрямована на надання сліпій людині повної автономії та безпеки при приготуванні та споживанні кави чи будь-якого іншого напою. Проект «Розумної чашки» для сліпої людини, яка б дозволила їй самостійно готувати каву/чай та пити її/його, можна втілити завдяки поєднанню тактильних відчуттів, звукових сигналів та сучасних технологій.

Тому, кіберфізична система «Розумна чашка» для людей з вадами зору містить:

1) підсистему контролю наповнення з голосовими підказками – чашка оснащена датчиком рівня рідини, який, поєднуючись з голосовим синтезатором, надає чіткі інструкції, наприклад: «Рівень 20%», «Рівень 50%», «Рівень 80%», «Чашка майже повна, зупиніться!» тощо, що виключає переливання та ризик опіків;

2) підсистему індукційного нагріву та автоматичного відключення – вбудований індукційний елемент у підставку чашки забезпечує безпечний та швидкий нагрів води без відкритого вогню чи гарячої плити; підсистема автоматично вимикається після досягнення заданої температури (датчик температури) або якщо чашка порожня (датчик рівня рідини), запобігаючи перегріву; чашка подає звуковий сигнал, коли температура досягла заданого користувачем значення (через мікрофон смартфона та спеціальний мобільний застосунок);

3) підсистему зважування з голосовими підказками – у підставку чашки інтегровано високоточні ваги; при додаванні інгредієнтів (кави, цукру) голосовий синтезатор повідомляє, наприклад: «Додано 5 грамів кави», «Рекомендована порція для однієї чашки – 8 грамів», «Додано 10 грамів цукру» тощо, що забезпечує точне дозування без візуального контролю;

4) підсистему голосового температурного індикатора – чашка активно повідомляє про температуру напою, наприклад: «Температура 30°C», «Температура 60°C», «Температура 85°C» тощо, що дозволяє уникнути опіків або пиття холодного напою;

5) підсистему живлення – чашка працює від вбудованого акумулятора з бездротовою зарядкою, що дозволяє її легко розміщувати на зарядній станції без необхідності підключати кабелі;

6) підсистему зв'язку через Bluetooth зі смартфоном, яка дозволить використовувати мікрофон у смартфоні та встановити через спеціальний мобільний застосунок у смартфоні рівень ідеальної температури для користувача, напій, який користувач готує, тощо;

7) підсистему акустичного локатора – дистанційна активація звукового сигналу через телефон, чашка подає приглушений сигнал (біп), допомагаючи локалізувати себе у просторі кухні;

8) підсистему гігієнічного контролю з голосовими підказками – використання датчика мутності (turbidity sensor) води після миття з голосовим сигналом: «Чашка чиста» або «Потрібне додаткове промивання», що є критичним для безпеки здоров'я;

9) інтерфейс користувача з нульовим зором» (Zero-Visual UI): термоізолюваний корпус та тактильні індикатори температури – зовнішній корпус чашки виготовлений з термоізолюючого матеріалу, що дозволяє тримати її, не обпалюючись; додатково, чашка має рельєфні ділянки, які змінюють свою текстуру залежно від температури (датчик температури): гладка – холодна, злегка шорстка – тепла, з чіткими виступами – гаряча; тактильні мітки для орієнтації – ручка чашки має ергономічну форму з рельєфними мітками, що вказують на отвір для пиття; це дозволяє користувачеві швидко знайти правильне положення для комфортного пиття; ергономічна кришка з питним клапаном та датчиком тиску – кришка чашки має герметичний клапан, який легко відкривається/закривається одним натисканням і запобігає розливанню; якщо напій занадто гарячий і створюється надлишковий тиск пари, кришка блокує клапан для пиття, доки температура не впаде до безпечної (додатковий фізичний бар'єр проти опіків).

Ця «Розумна чашка» перетворює процес приготування та споживання кави на безпечний, точний та комфортний досвід для сліпих людей, надаючи їм незалежність та впевненість. Цей концепт об'єднує сенсорну інформацію, яка є критично важливою для людей з порушенням зору, з функціональністю, що допомагає їм почуватися більш незалежними у повсякденних справах. Запропонована концепція перетворює розроблювану «Розумну чашку» з простого асистивного пристрою на повноцінну кіберфізичну систему, де фізичні процеси (нагрів, наповнення) тісно інтегровані з обчислювальними алгоритмами та мобільними інтерфейсами.

Структура будь-якої кіберфізичної системи базується на тривірневій ієрархії взаємопов'язаних компонентів. Фундаментом виступає фізичний рівень, де за допомогою мережі датчиків здійснюється пряме вимірювання необхідних параметрів середовища (рівень рідини, температура, тиску, ваги, мутності тощо). Наступною ланкою є середній рівень, представлений контролером або системою контролерів. Їхнє завдання полягає в акумуляції сигналів від сенсорів, проведенні первинної обробки даних та їхній трансляції до центральних баз даних або спеціалізованого програмного забезпечення. Завершує архітектуру верхній, кібернетичний рівень, де аналітичне ПЗ виконує глибоку обробку отриманої інформації. На основі складних алгоритмів цей рівень формує прогнози, надає рекомендації та забезпечує автоматизацію процесів прийняття рішень.

Для реалізації кіберфізичної системи «Розумна чашка» контролер має бути компактним, підтримувати бездротові протоколи (Bluetooth для зв'язку зі смартфоном) та мати достатньо аналогових і цифрових входів для 9 вищеописаних підсистем. Результати проведеного порівняльного аналізу трьох найбільш популярних платформ для таких розробок представлені у Таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз контролерів

Характеристика	Arduino Nano (ATmega328P)	ESP32-WROOM-32	STM32 (Blue Pill)
Процесор	8-біт	32-біт (Dual Core)	32-біт
Тактова частота	16 МГц	160–240 МГц	72 МГц
Бездротовий зв'язок	Відсутній (потребує модулів)	Wi-Fi + Bluetooth (Dual Mode)	Відсутній
Енергоспоживання	Низьке	Дуже низьке (Deep Sleep)	Низьке
Об'єм пам'яті (Flash)	32 КБ	4 МБ	64/128 КБ
Підтримка Audio/Voice	Дуже обмежена	Висока (I2S для синтезу мовлення)	Середня
Габарити	Малі	Дуже малі	Малі

Для кіберфізичної системи «Розумна чашка» найкращим вибором є контролер ESP32, оскільки він має інтегрований Bluetooth, що є критичним для підсистеми зв'язку через Bluetooth зі смартфоном, та дозволяє підключатися до смартфона без додаткових громіздких модулів. Завдяки вбудованому інтерфейсу I2S та високій обчислювальній потужності, ESP32 може відтворювати стиснуті аудіофайли або генерувати голос, що необхідно для підсистеми контролю наповнення з голосовими підказками, підсистеми зважування з голосовими підказками, підсистеми голосового температурного індикатора, підсистеми гігієнічного контролю з голосовими підказками. Оскільки чашка працює від акумулятора, ESP32 може «засинати», коли нею не користуються, і миттєво «прокидатися» при спрацюванні датчика руху або ваги. ESP32 має достатньо контактів для їх одночасного обслуговування великої кількості датчиків описаних вище підсистем. ESP32 має вбудовані ємнісні сенсори дотику, що може спростити реалізацію тактильних інтерфейсів.

Враховуючи описані вище підсистеми кіберфізичної системи «Розумна чашка», а також проведений вибір контролера для такої кіберфізичної системи, спроектуємо архітектуру кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору – рис. 2.

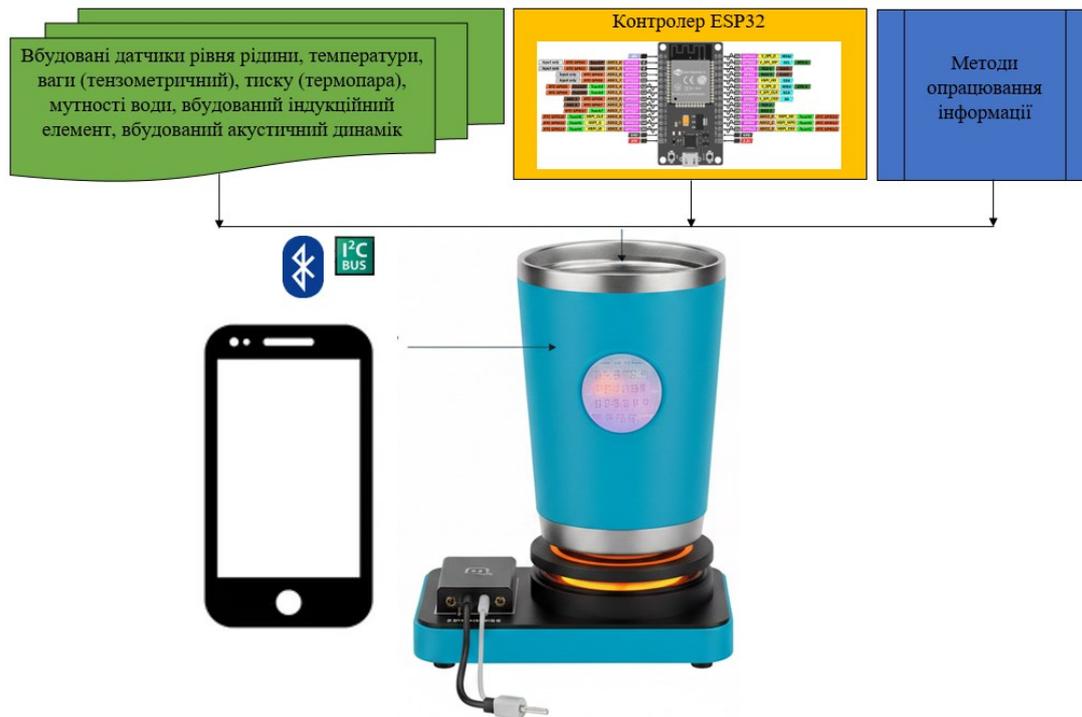


Рис. 2. Архітектура кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору

Пропонована кіберфізична система «Розумна чашка» для людей з вадами зору є ною науковою концепцією, яка відрізняється від відомих засобів концептуалізацією мультимодального інтерфейсу «Zero-Visual UI» (вперше запропоновано поєднання динамічної тактильної індикації із голосовим супроводом у межах єдиного побутового пристрою), інтелектуальною системою безпеки (розроблено механізм адаптивного блокування питного клапана на основі аналізу тиску пари та температури, що створює фізичний бар'єр для запобігання опікам), реалізацією автоматизованого гігієнічного контролю (запропоновано використання оптичних сенсорів мутності для верифікації чистоти ємності в умовах відсутності візуального контролю, що розширює функціонал асистивних технологій у сфері охорони здоров'я), кіберфізичною інтеграцією, яка дозволяє персоналізувати процес приготування напоїв через цифрові профілі користувача.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі проаналізовано сучасний стан проблеми, що характеризується стрімким зростанням кількості осіб із порушеннями зору в глобальному масштабі, що за прогнозами може сягнути 703 мільйонів осіб до 2050 року. Проведене дослідження підтверджує надзвичайну актуальність розробки спеціалізованих асистивних технологій, що зумовлено невтішною динамікою зростання кількості людей із порушеннями зору в усьому світі та складністю їхньої побутової адаптації.

Оскільки зір забезпечує понад 90% вхідної інформації, його втрата вимагає залучення глибоких нейрофізіологічних механізмів крос-модальної пластичності, де провідну роль у пізнавальній діяльності починають відігравати слуховий та тактильний аналізатори. Авторами детально розглянуто нейрофізіологічні засади компенсації втрачених функцій зору через механізми крос-модальної пластичності головного мозку. Встановлено, що здатність мозку до реорганізації та перепрограмування візуальних зон кори для обробки сигналів від інших органів чуття створює фундаментальну базу для впровадження високотехнологічних асистивних рішень. Саме ці знання про адаптивний потенціал мозку та процеси компенсації стали фундаментальним підґрунтям для проєктування кіберфізичної системи, яка трансформує візуальні параметри середовища у доступні для сприйняття незрячою людиною сигнали.

Аналіз наявних на ринку та описаних у науковій літературі аналогів показав, що більшість існуючих рішень фокусується на вузькоспеціалізованих завданнях, як-от просте сповіщення про рівень рідини за допомогою накладних датчиків. На відміну від них, запропонована кіберфізична система «Розумна чашка» є цілісним інтегрованим рішенням, яке базується на інтеграції дев'яти взаємопов'язаних підсистем, що забезпечують комплексний контроль процесу і не лише інформують користувача, а й автоматизують процеси нагріву та дозування інгредієнтів, забезпечуючи новий рівень автономії. Це дозволяє перейти від концепції простих асистентних засобів до повноцінної інтелектуальної взаємодії фізичних процесів із цифровими інтерфейсами.

Наукова новизна розробки полягає у впровадженні унікальної концепції мультимодального

інтерфейсу «Zero-Visual UI», який вперше поєднує голосовий супровід із динамічною тактильною індикацією, що змінює текстуру корпусу залежно від температури напою. Важливою перевагою системи є інтелектуальний контур безпеки, що включає адаптивне блокування питного клапана при надлишковому тиску пари, а також використання сенсорів мутності для об'єктивного контролю гігієни ємності за відсутності візуального нагляду. Такі науково-інженерні рішення безпосередньо спрямовані на нівелювання ризиків побутового травматизму та покращення санітарної безпеки користувачів з вадами зору.

Вибір мікроконтролера ESP32 як центрального вузла архітектури є технічно обґрунтованим завдяки його високій обчислювальній потужності, підтримці бездротового зв'язку та здатності до синтезу мовлення. Трирівнева архітектура системи, що охоплює фізичний, середній та кібернетичний рівні, дозволяє ефективно акумулювати дані з численних датчиків, проводити їх аналіз та забезпечувати персоналізацію через мобільний застосунок. Це створює умови для гнучкого налаштування пристрою під індивідуальні потреби користувача, включаючи встановлення ідеальних температурних режимів та рецептур.

У підсумку, розроблений концепт кіберфізичної системи «Розумна чашка» демонструє потенціал докорінного підвищення якості самостійного життя людей із вадами зору шляхом перетворення простого побутового пристрою на складну інтелектуальну систему, яка забезпечує незрячим людям повну безпеку від опіків, точність дозування інгредієнтів та впевненість у щоденних справах, сприяючи розвитку інклюзивного середовища. Поєднання індукційного нагріву, системи точного зважування та голосового температурного індикатора перетворює рутинний процес приготування напоїв на безпечний та контрольований досвід. Подальша реалізація та впровадження подібних смарт-об'єктів сприятиме розвитку інклюзивного суспільства, надаючи людям із сенсорними обмеженнями більше впевненості у повсякденних справах.

References

1. Ackland P., Resnikoff S., Bourne R. World blindness and visual impairment: Despite many successes, the problem is growing. *Community Eye Health Journal*. 2018. Pp. 71–73. PMID: 29483748.
2. Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study / R. Bourne et al. *The Lancet Global Health*. 2020. URL: [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(20\)30425-3](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(20)30425-3).
3. Louis Braille, el ciego que enseñó a ver / J. Peraza-Nieves et al. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*. 2015. Vol. 90, no. 9. P. e71-e73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oftal.2015.02.003>.
4. Handwritten Text to Braille for Deaf-Blinded People Using Deep Neural Networks and Python / T. Parthiban et al. *Mobile Radio Communications and 5G Networks*. Singapore, 2022. P. 379–393. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-16-7018-3_28.
5. RNIB Liquid Level Indicator. URL: <https://shop.rnib.org.uk/products/rnib-liquid-level-indicator>.
6. 2-Stage Liquid Level Indicator. URL: <https://ssproducts.com/2-stage-liquid-level-indicator/?srsltid=AfmBOoQSwvvi1ohAC0AjaJZM3XUqBMO5xsvb1CyeiImNdRcPAXzIhl5d>.
7. DK205 Liquid Level Indicator. URL: https://talkingwatchshop.co.uk/products/dk205-liquid-level-indicator/?srsltid=AfmBOoqbOygpct5wmWOle37C9nZG1bL0rET0hzMcdJbb1_Ri0BQjTH8v.
8. Senjam S. Assistive Technology for People with Visual Loss. *Delhi Journal of Ophthalmology*. 2019. Vol. 30, no. 2. URL: <https://doi.org/10.7869/djo.496>.
9. Smart Glass for Visually Impaired Person / A. Shunaran et al. *Intelligent Systems, Business, and Innovation Research*. Cham, 2024. P. 627–633. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_52.
10. Design and implementation of smart guided glass for visually impaired people / M. T. Islam et al. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. Vol. 12, no. 5. P. 5543. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i5.pp5543-5552>.
11. Rajendran P. S., Krishnan P., Aravindhar D. J. Design and Implementation of Voice Assisted Smart Glasses for Visually Impaired People Using Google Vision API. *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, 5–7 November 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/iceca49313.2020.9297553>.
12. Jebrel A., Imbayah I., Alsharif A., Ahmed A. A., Ali A. M. Design and Implementation of a Walking Smart Stick for the Visually Impaired and the Blind. *International Journal of Electrical Engineering And Sustainability*. 2023. Vol. 1. Issue 4. Pp. 64–74.
13. Smart cap: An IOT based assistant for visually impaired people / G. A. Lakshmi et al. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES IN ENGINEERING AND SCIENCE: ICETES2023*, Kanchikacherla, India. 2025. P. 020113. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0244968>.
14. Smart Cup Holder For Visually Impaired People / A. Aryanti et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1500. P. 012095. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012095>.
15. Chandankhede P. H., Fatinge P. M., Vaidya K. S. Development of Smart Cup for Monitoring Post Stroke Patients. *2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)*, Gwalior, India, 14–16 March 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/iatmsi60426.2024.10502524>.
16. Smart Cup for a Smart Pill Dispenser for Verification of Pill Consumption / S. R. Minera et al. *2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Las Vegas, NV, USA, 8–11 March 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ccwc57344.2023.10099363>.
17. Grant A. C., Thiagarajah M. C., Sathian K. Tactile perception in blind Braille readers: A psychophysical study of acuity and hyperacuity using gratings and dot patterns. *Perception & Psychophysics*. 2020. Vol. 62, no. 2. P. 301–312. URL: <https://doi.org/10.3758/bf03205550>.
18. Koehler H., Croy I., Oleszkiewicz A. Late blindness and deafness are associated with decreased tactile sensitivity, but early blindness is not. *Neuroscience*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2023.06.016>.
19. Comparative Analysis of Tactile Sensitivity between Blind, Deaf and Unimpaired People / I. L. Barbacena et al. *2018 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Ottawa, ON, Canada, 9–10 May 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/memea.2008.4542990>.
20. Norman J. F., Bartholomew A. N. Blindness enhances tactile acuity and haptic 3-D shape discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2011. Vol. 73, no. 7. P. 2323–2331. URL: <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0160-4>.