

УДК 004.72

АНДРІЙ СОКОЛОВ, ОЛЕГ ДАЦОК, ТЕТЯНА НОСОВА, ТЕТЯНА ЖЕМЧУЖКІНА,
ВАЛЕНТИН МЕЛЬНИК, ЛІЛІЯ АВЕР'ЯНОВА, ОЛЕГ АВРУНІН

БІОФІЗИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО МОДУЛЯ ДО ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ ТАКТИЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОСІБ З ВАДАМИ ЗОРУ

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна,
e-mail: andrii.sokolov@nure.ua, oleg.avrunin@nure.ua*

Анотація. У роботі представлено підхід до побудови персональної навігаційної системи для осіб з порушеннями зору, що базується на поєднанні методів комп'ютерного зору та тактильного зворотного зв'язку. Запропоновано архітектуру системи, яка використовує смартфон сенсорну платформу та модифіковану перчатку з вібраційними моторами як засіб подачі просторової інформації. Розглянуто біофізичні основи тактильного сприйняття, на основі яких сформульовано вимоги до частотного діапазону, місця розташування моторів та структури вібросигналу. Запропонована система є масштабованою, енергоефективною та придатною до щоденного використання в умовах обмеженої інфраструктури.

Ключові слова: тактильний зворотний зв'язок, просторове сприйняття, система навігації, незрячі користувачі, механорецептори, носимі пристрої

Abstract. The paper presents an approach to building a personal navigation system for people with visual impairments, based on a combination of computer vision and haptic feedback methods. The architecture of the system is proposed, which uses a smartphone sensor platform and a modified glove with vibration motors as a means of providing spatial information. The biophysical foundations of tactile perception are considered, on the basis of which the requirements for the frequency range, location of the motors and the structure of the vibration signal are formulated. The proposed system is scalable, energy-efficient and suitable for daily use in conditions of limited infrastructure.

Keywords: haptic feedback, spatial perception, navigation system, blind users, mechanoreceptors, wearable devices.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-215-222

1. ВСТУП

Особи з порушеннями зору щоденно стикаються з обмеженнями, які для більшості людей залишаються малопомітними - хаотично запарковані автомобілі, відсутність тактильних орієнтирів, незвучені номери маршрутів на зупинках громадського транспорту, складність орієнтації в незнайомих будівлях, магазинах та установах. Навіть у великих містах доступне середовище залишається фрагментарним, а базова інфраструктура адаптована лише частково. Це обмежує мобільність, підвищує ризик травматизму та фактично змушує значну частину людей з вадами зору покладатися на супровід родичів або соціальні служби [1].

Попри розвиток інклюзивних підходів, ситуація в Україні ускладнюється низьким рівнем матеріального забезпечення осіб з вадами зору. Аналіз державних програм фінансування показує переважну орієнтацію на забезпечення ортопедичними засобами й засобами пересування [2], що пов'язане з військовим станом. Сучасні навігаційні пристрої майже не охоплюються системою підтримки. Приймаючи до уваги рівень матеріального забезпечення, придбання ти флотехнічних засобів частіше за все є економічно недосяжним для більшості потенційних користувачів.

Паралельно з цим, розвиток мобільних технологій, комп'ютерного зору та доступних мікроконтролерів створює передумови для створення недорогих індивідуальних систем навігації.

Смартфон із камерою, модулем інерційної навігації та підтримкою технологій доповненої реальності може виконувати роль сенсорного ядра, тоді як портативні пристрої з тактильним зворотним зв'язком забезпечують інтуїтивну подачу просторової інформації без перевантаження слухового каналу. Саме поєднання комп'ютерного зору, карти глибини та тактильної індикації виглядає перспективним напрямком, здатним підвищити автономність користувачів за умови збереження низької вартості системи.

Тому, особливу актуальність набувають дослідження, спрямовані на створення навігаційних асистентів, орієнтованих на українські реалії: нестабільну інфраструктуру, обмежене державне фінансування, необхідність працювати без постійного доступу до інтернету і доступність для малозабезпечених людей.

2. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОСІБ З ПОРУШЕННЯМ ЗОРУ

Сучасні індивідуальні системи навігації для людей з вадами зору можна умовно розділити на декілька основних класів: модифіковані білі тростини, носимі вібраційні або ультразвукові пристрої, смарт-окуляри з комп'ютерним зором та мобільні застосунки, що використовують GPS і камеру смартфона. Кожен з підходів має власні переваги та обмеження, які важливо враховувати при проєктуванні нових рішень.

Розумні тростини з ультразвуковими модулями. Вони доповнюють класичну білу тростину ультразвуковими сенсорами для виявлення перешкод на рівні тулуба й голови та використовують вібраційні або звукові сигнали для попередження про небезпеку. Перевагою є збереження звичної техніки користування тростиною та підвищення безпеки при переміщенні у міському середовищі. Водночас ці пристрої, як правило, не виконують повноцінних навігаційних функцій (прокладання маршрутів, аналіз сцени, розпізнавання типу об'єктів) і мають суттєву вартість від кількох сотень до понад тисячі доларів, що робить їх малодоступними для користувачів з низьким рівнем доходу.

Портативні вібраційні браслети та кліпси - використовують ультразвук або GPS-навігацію та передають інформацію про перешкоди або напрямок руху через вібрацію на зап'ясті. Такі рішення добре підходять як доповнення до тростини або собаки-поводиря та дозволяють зменшити залежність від постійних голосових підказок. Основні недоліки - обмежений просторовий радіус дії, відсутність детекції типів перешкод та відносно висока ціна навіть для спрощених моделей. Частина таких пристроїв знята з виробництва, що ускладнює їх придбання і сервісну підтримку.

Смарт-окуляри з комп'ютерним зором фокусуються насамперед на розпізнаванні тексту, обличч та об'єктів і озвучуванні отриманої інформації. Вони ефективні у задачах читання, роботи з документами, навігації у приміщеннях із добре структурованим середовищем наприклад - магазини. Однак ці системи, як правило, не формують повноцінну просторову карту сцени й не забезпечують просторову інформацію. Вони мають високу вартість, від тисячі доларів.

Мобільні застосунки та використовують GPS, хмарні сервіси та методи комп'ютерного зору для надання голосових підказок про оточення. Більшість з них орієнтована переважно на опис аудіо сцени – озвучування тексту, опис сцени, опис емоцій на обличчі співбесідника. Лише декілька безкоштовних додатків забезпечують голосову навігацію в міському середовищі, інтегруючись з відкритими картографічними сервісами та BLE-маячками.

Перевага таких рішень - відносно низький поріг входу й можливість використання на наявних смартфонах. Водночас вони мають низку обмежень: залежність від стабільного інтернет-з'єднання, прив'язка до конкретних операційних систем, відсутність тактильного інтерфейсу та складність застосування в шумних умовах, де слух уже сильно перевантажений [3-5].

Інтегровані програмно-апаратні комплекси. Наприклад, Vired [6] - гарнітура з декількома камерами та вбудованим комп'ютером, яка аналізує динамічні об'єкти й прогнозує потенційні зіткнення, використовуючи підходи, що використовуються при проєктуванні безпілотного транспорту. Такі системи демонструють найвищий рівень функціональності за рахунок використання 3D-камер, глибинних моделей та регулярного вдосконалення ПО, але їх висока вартість практично унеможливорює їх застосування як масового засобу навігаційної підтримки.

У цих умовах перспективним напрямком є розробка комбінованих систем, які:

- використовують наявні у користувача смартфони з підтримкою ARCore або ARKit для побудови мапи глибини та інференсу нейронної мережі для детекції об'єктів;

- застосовують тактильний інтерфейс як основний канал просторового зворотного зв'язку, мінімізуючи залежність від звуку;
- мають відкриту архітектуру, що дозволяє адаптувати систему під індивідуальні потреби та залучити дослідників з інших міст або країн;
- залишаються фінансово доступними за рахунок використання масових компонентів та вільно доступного програмного забезпечення.

В роботі пропонується підхід, у якому модуль тактильного зворотного зв'язку інтегрується з мобільним застосунком, утворюючи єдину та доступну навігаційну систему, орієнтовану на щоденне використання в реальних умовах.

3. БІОФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТАКТИЛЬНОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Тактильна чутливість людини охоплює сприйняття вібрацій важливих сигналів навколишнього середовища та руху. Вібраційне відчуття відіграє ключову роль у розпізнаванні текстури, використанні інструментів та підтримці рівноваги. Біофізика цього відчуття ґрунтується на роботі шкірних механорецепторів, які перетворюють механічні коливання шкіри на нервові імпульси.

У шкірі людини є декілька типів механорецепторів, але сприйняття вібрації переважно забезпечується швидко адаптивними тільцями Пачіні та Мейсснера. Інші рецептори, такі як тільця Меркеля та Руффіні, реагують переважно на постійний тиск або розтягнення, вносячи менший внесок у високочастотні вібраційні відчуття.

1. Тільця Пачіні (пластинчасті тільця). Це швидко адаптивні рецептори, розташовані у шарі дерми та підшкірному шарі. Вони мають великі рецептивні поля (один рецептор може охоплювати область майже в цілу долоню) і особливо чутливі до високочастотних вібрацій приблизно в діапазоні 100-300 Гц, з піком чутливості близько 250 Гц. Ці рецептори відповідають за відчуття швидкого тремтіння та тонких вібрацій, наприклад, при дотику до працюючого механізму [7,8].

2. Тільця Мейсснера (дотикові тільця). Це швидко адаптивні рецептори, розташовані поверхнево (сосочковий шар дерми у гладкій шкірі пальців і долонь). Вони мають малі рецептивні поля та високу щільність на кінчиках пальців, що забезпечує високу просторову точність. Рецептори Мейсснера найбільш чутливі до низькочастотних коливань у діапазоні 10-50 Гц. Ці рецептори дозволяють відчувати легке тремтіння, ковзання по шкірі або текстуру на малій швидкості [7,8].

3. Диски Меркеля (епітеліальні комплекси). Це повільно адаптивні механорецептори у базальному шарі епідермісу. Мають малі рецептивні поля та високу роздільну здатність. Основна функція тривале відчуття тиску, текстури та форми предметів при статичному дотику. Вони менш важливі для сприйняття вібрації вище кількох герц, але можуть реагувати на дуже низькочастотні періодичні тиски, доповнюючи відчуття ритмічного натискання [7,8].

4. Закінчення Руффіні. Це повільно адаптивні рецептори, що розташовуються глибше в дермі та зв'язках. Мають витягнуту форму і реагують переважно на розтягнення шкіри та деформацію тканин. Вони інформують про положення пальців і форму захоплених об'єктів, відповідаючи на тривалі напруження. Вібрації як такі кодуються ними слабо; внесок Руффіні проявляється у сприйнятті дуже повільних коливань або постійного зміщення шкіри [7,8].

Здатність визначати точне місце розташування вібраційного стимулу на шкірі залежить від розмірів рецептивних полів та щільності механорецепторів. Загалом, просторова роздільна здатність вібраційних відчуттів гірша при вищих частотах. Це пов'язано з тим, що високочастотні вібрації збуджують головним чином тільця Пачіні, які мають дуже великі рецептивні поля та низьку просторову чутливість.

Загалом, для завдання тактильної індикації та зворотного зв'язку найбільш цікавими є тільця Мейсснера, які здатні реагувати на патерни вібраційних сигналів низької частоти.

4. АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ

Запропонована система просторової навігації базується на інтеграції смартфона та модуля тактильного зворотного зв'язку. Архітектура побудована з урахуванням мінімізації кількості апаратних компонентів і можливості використання вже наявного в користувача смартфона, рис. 1.

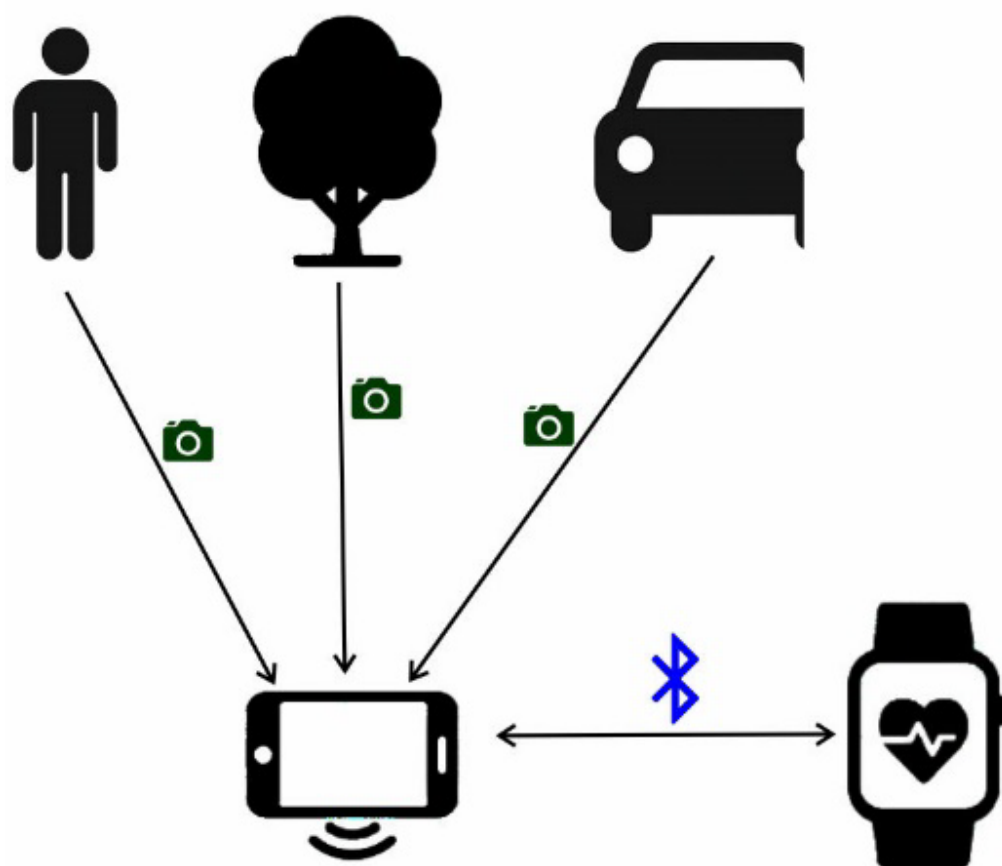


Рисунок 1 – Архітектура системи персоналізованої просторової навігації для осіб з вадами зору.

Оснoву системи становить смартфон, який викoнує функції візуального сенсора: захоплення зображення, побудова карти глибини, розпізнавання об’єктів за допомогою нейронної мережі. Усі обчислення виконуються локально, що дозволяє працювати в умовах відсутності інтернет-з’єднання. Визначаються такі об’єкти середовища як транспорт, пішоходи, перешкоди. На основі класів об’єктів та відстаней до них формується пакет для модуля тактильного зв’язку.

Модуль зворотного зв’язку позначений на схемі як браслет. Він отримує дані через Bluetooth Low Energy. Тактильна інформація формується на основі нормованих координат об’єктів, а тип вібраційного сигналу залежить від класу об’єкта й відстані до нього [9].

Таким чином, система поєднує інтелектуальне сприйняття сцени з ефективною тактильною індикацією, зберігаючи автономність, простоту конструкції та низьку вартість реалізації.

5. РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ МОДУЛЯ ТАКТИЛЬНОГО ЗВ’ЯЗКУ

Модуль тактильного зворотного зв’язку призначений для надання користувачеві інформації про розташування об’єктів у навколишньому просторі за допомогою тактильної стимуляції у вигляді вібрації. Це особливо актуально в завданнях просторової навігації для осіб з порушеннями зору, яким недоступні візуальні орієнтири, а слух часто перевантажений фоновим шумом міського середовища.

Апаратна реалізація модуля базується на використанні масиву вібрoдвигунів типу ERM та керуючого блоку на мікроконтролері ESP32. Конструктивно система поділена на дві основні частини: блок живлення та керування, що розміщується на передпліччі, та сенсорна частина, сформована гнучкою основою з вібрoдвигунів, розміщеними в зоні кисті й пальців. Така компоновка реалізована у вигляді модифікованої рукавички, в якій тактильні елементи розташовані безпосередньо на ділянках шкіри з високою чутливістю. Принципова схема пристрою наведена на рисунку 2.

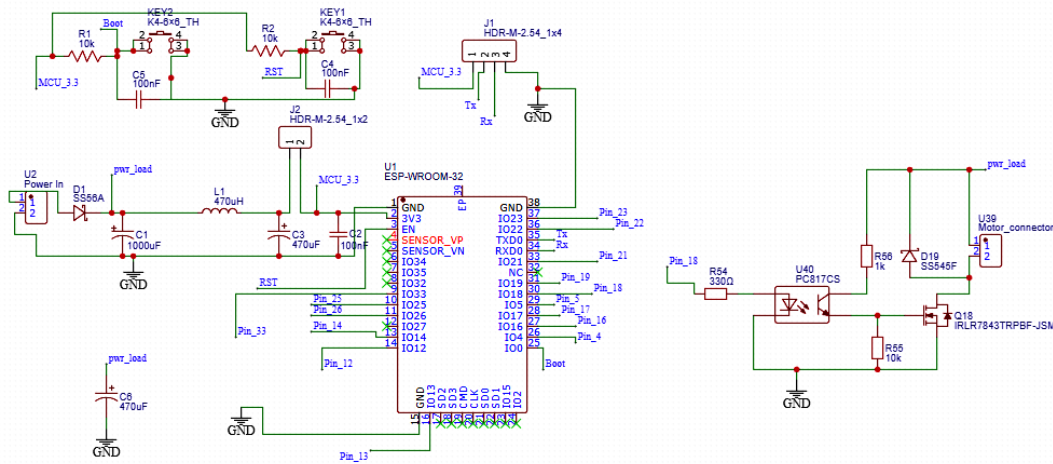


Рисунок 2 – Принципова схема.

Запропонована архітектура обґрунтована з фізіологічної точки зору: анатомічні особливості шкіри долонь і пальців передбачають високу щільність швидко адаптивних механорецепторів, зокрема, тілець Мейснера та Пачіні, які мають низькі пороги чутливості до вібрації та високу розрізняльну здатність. Це забезпечує ефективне сприйняття вібраційних сигналів навіть за невеликої амплітуди. Натомість шкіра передпліччя характеризується меншою щільністю рецепторів і вищими порогоми детекції, що знижує її ефективність у передачі тонкої тактильної інформації [10-13]. Водночас ця зона зручна для розміщення габаритних та важких компонентів, таких як акумулятор і мікроконтролер, без погіршення ергономіки пристрою. Підходи щодо автоматизованого аналізу біосигналів більш ретельно розглянуто у джерелах [14-16].

Кожному вібромотору відповідає окремий сектор поля зору, що визначається нормованими координатами, отриманими від сенсорної системи. Об'єкти, виявлені в сцені, проєктуються на площину тактильної поверхні та відповідним чином відображаються на один або кілька каналів вібрації. Формування керувальних сигналів здійснюється з урахуванням належності об'єкта до певного класу, що дозволяє задавати розпізнавані вібраційні патерни з використанням широтно-імпульсної модуляції. У результаті користувач отримує інформацію про положення і відстань до об'єкта, та про його тип – завдяки розрізняваному сигналу, рис. 3.

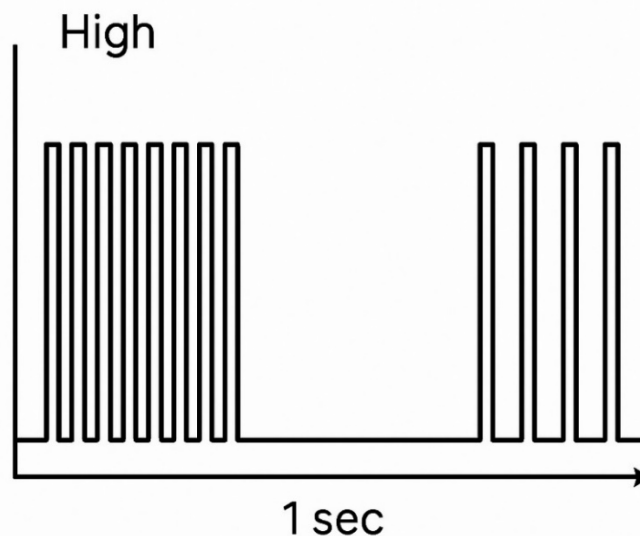


Рисунок 3 – Приклад тактильного сигналу.

З метою підвищення чіткості сприйняття та запобігання швидкій сенсорній адаптації використовуються імпульсні режими активації та чергування пауз. Це забезпечує стійке сприйняття сигналу протягом тривалого часу й зменшують ефект втоми рецепторів.

Запропонована система має високу масштабованість і адаптивність: архітектура дозволяє легко змінювати кількість тактильних каналів, конфігурацію розміщення вібромоторів залежно від анатомічних особливостей користувача або вимог конкретного сценарію, а також варіювати логіку активації з урахуванням особливостей сприйняття. Це забезпечує універсальність рішення та його придатність до широкого спектру практичних застосувань.

ВИСНОВКИ

У статті розглянуто підхід до створення мікроконтролерного модуля системи просторової навігації для осіб з порушеннями зору, що базується на поєднанні візуального аналізу сцени та тактильного зворотного зв'язку. Проведено аналіз фізіологічних основ ефективного використання вібраційної стимуляції як каналу просторової індикації. На підставі результатів можна сформулювати низку практичних висновків:

Для забезпечення достатньої розрізняльної здатності тактильних сигналів вібромотори мають бути розташовані в зонах із високою щільністю механорецепторів, передусім у ділянці долоні й пальців. Використання передпліччя для зворотного зв'язку є малоефективним через знижені сенсорні характеристики.

Ефективна стимуляція потребує частотного діапазону 10-50 Гц, що охоплює чутливість тілець Мейснера. При цьому оптимальною є імпульсна або модульована вібрація, яка знижує ефект адаптації рецепторів.

Передача просторової інформації повинна базуватися на нормованих координатах і гнучкому перетворенні карти глибини у масив активних зон, що дозволяє масштабувати систему та адаптувати її під різну кількість вібромоторів.

Запропонований підхід забезпечує базу для подальшої розробки адаптивних навігаційних пристроїв з носимим інтерфейсом, який відповідає як фізіологічним особливостям шкіри, так і інженерним вимогам до мобільних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dunai L., Peris-Fajarnés G., Lluna E., and Defez B., "Sensory Navigation Device for Blind People," *Journal of Navigation*, vol. 66, no. 3, pp. 349–362, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1017/s0373463312000574>.
2. Kitsoft, "Фонд соціального захисту осіб з інвалідністю - Інформація про проведення фінансування для забезпечення ДЗР," *Ispf.gov.ua*, 2025. <https://www.ispf.gov.ua/diyalnist/zabezpechennya-tehnichnimi-zasobami-reabilitaciyi/informaciya>
3. Lo A., Valvo, Croce D., Garlisi D., Giuliano F., Giarré L., and Tinnirello I., "A Navigation and Augmented Reality System for Visually Impaired People," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3061, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21093061>.
4. Sokolov A. A. and Avrunin O. G., "Prospects of using augmented reality technologies in the development of navigation tools for the blind," *Optoelectronic Information-Power Technologies*, vol. 46, no. 2, pp. 55–63, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-55-63>.
5. Sokolov A. A. and Avrunin O. G., "Evaluation of ARCORE library capabilities for determining the distance to objects in the frame," *Optoelectronic Information-Power Technologies*, vol. 47, no. 1, pp. 58–65, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-58-65>.
6. "Spending a day with NOA," *Biped.ai*, 2025. <https://www.biped.ai/a-day-with-noa/>
7. Birznies I. et al., "Tactile sensory channels over-ruled by frequency decoding system that utilizes spike pattern regardless of receptor type," *eLife*, vol. 8, p. e46510, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.46510>.
8. Quindlen J. C., Lai V. K., and Barocas V. H., "Multiscale Mechanical Model of the Pacinian Corpuscle Shows Depth and Anisotropy Contribute to the Receptor's Characteristic Response to Indentation," *PLoS Computational Biology*, vol. 11, no. 9, Sep. 2015, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004370>.
9. Sokolov A., Avrunin O., and Sokolov A., "Theoretical Foundations for Designing Portable Systems for Oriented Blind People," 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications,

- Science and Technology (PIC S&T), pp. 379–382, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/picst57299.2022.10238588>.
10. Hersh M., “Wearable Travel Aids for Blind and Partially Sighted People: A Review with a Focus on Design Issues,” *Sensors*, vol. 22, no. 14, p. 5454, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22145454>.
 11. Ballardini G., Florio V., Canessa A., Carlini G Morasso., P., and Casadio M., “Vibrotactile Feedback for Improving Standing Balance,” *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 8, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00094>.
 12. Kingma H. et al., “Vibrotactile feedback improves balance and mobility in patients with severe bilateral vestibular loss,” *Journal of Neurology*, vol. 266, no. S1, pp. 19–26, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00415-018-9133-z>.
 13. Birznies I et al., “Tactile sensory channels over-ruled by frequency decoding system that utilizes spike pattern regardless of receptor type,” *eLife*, vol. 8, p. e46510, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.46510>.
 14. Zhemchuzhkina T., Nosova T., "Analysis of the dynamics of statistical and spectral indicators of electromyograms of the lumbar region," Scientific Collection “InterConf”, (96): with the Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference Scientific Community: Interdisciplinary Research (January 26-28, 2022). Hamburg, Germany: Busse Verlag GmbH, 2022. 1206 p., pp. 683-686
 15. Selivanova K. G., Avrunin O. G. “Quality improvement of diagnosis of the electromyography data based on statistical characteristics of the measured signals”, *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016*, 100312R <https://doi.org/10.1117/12.2248953>.
 16. Павлов С. В., Аврунін О. Г., Злепко С. М., Бодянський Є. В., Колісник П. Ф., Лисенко О. М., Чайковський І. А., Філатов В. О. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. 260 с.
 17. Kozhem'yako V. P. Optical-electronic methods and tools for processing and analyzing biomedical images [monograph] / V. P. Kozhem'yako, S. V. Pavlov, K. I. Stanchuk. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2006 – 203 p.
 18. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
 19. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

REFERENCES

1. Dunai L., Peris-Fajarnés G., Lluna E., and Defez B., “Sensory Navigation Device for Blind People,” *Journal of Navigation*, vol. 66, no. 3, pp. 349–362, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1017/s0373463312000574>.
2. Kitsoft, “Social Protection Fund for Persons with Disabilities - Information on Financing for the Provision of Social Protection,” Ispf.gov.ua, 2025. <https://www.ispf.gov.ua/diyalnist/zabezpechennya-tehnichnimi-zasobami-reabilitaciyi/informaciya>
3. Lo A. Valvo, Croce D., Garlisi D., Giuliano F., Giarre L., and Tinnirello I., “A Navigation and Augmented Reality System for Visually Impaired People,” *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3061, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21093061>.
4. Sokolov A. A. and Avrunin O. G., “Prospects of using augmented reality technologies in the development of navigation tools for the blind,” *Optoelectronic Information-Power Technologies*, vol. 46, no. 2, pp. 55–63, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-55-63>.
5. Sokolov A. A. and Avrunin O. G., “Evaluation of ARCORE library capabilities for determining the distance to objects in the frame,” *Optoelectronic Information-Power Technologies*, vol. 47, no. 1, pp. 58–65, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-58-65>.
6. “Spending a day with NOA,” Biped.ai, 2025. <https://www.biped.ai/a-day-with-noa/>
7. Birznies I. et al., “Tactile sensory channels over-ruled by frequency decoding system that utilizes spike pattern regardless of receptor type,” *eLife*, vol. 8, p. e46510, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.46510>.
8. Quindlen J. C., Lai V. K., and Barocas V. H., “Multiscale Mechanical Model of the Pacinian Corpuscle Shows Depth and Anisotropy Contribute to the Receptor’s Characteristic Response to Indentation,” *PLoS Computational Biology*, vol. 11, no. 9, Sep. 2015, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004370>.

9. Sokolov A., Avrunin O., and Sokolov A., "Theoretical Foundations for Designing Portable Systems for Oriented Blind People," 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), pp. 379–382, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/picst57299.2022.10238588>.
10. Hersh M., "Wearable Travel Aids for Blind and Partially Sighted People: A Review with a Focus on Design Issues," Sensors, vol. 22, no. 14, p. 5454, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22145454>.
11. Ballardini G., Florio V., Canessa A., Carlini G. Morasso, P., and Casadio M., "Vibrotactile Feedback for Improving Standing Balance," Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, vol. 8, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00094>.
12. Kingma H. et al., "Vibrotactile feedback improves balance and mobility in patients with severe bilateral vestibular loss," Journal of Neurology, vol. 266, no. S1, pp. 19–26, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00415-018-9133-z>.
13. Birznies I et al., "Tactile sensory channels over-ruled by frequency decoding system that utilizes spike pattern regardless of receptor type," eLife, vol. 8, p. e46510, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.46510>.
14. Zhemchuzhkina T., Nosova T., "Analysis of the dynamics of statistical and spectral indicators of electromyograms of the lumbar region," Scientific Collection "InterConf", (96): with the Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference Scientific Community: Interdisciplinary Research (January 26-28, 2022). Hamburg, Germany: Busse Verlag GmbH, 2022. 1206 p., pp. 683-686
15. Selivanova K. G., Avrunin O. G. "Quality improvement of diagnosis of the electromyography data based on statistical characteristics of the measured signals ", Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 100312R <https://doi.org/10.1117/12.2248953>.
16. Pavlov S. V., Avrunin O. G., Zlepko S. M., Bodiansky E. V., Kolisnyk P. F., Lysenko O. M., Chaykovsky I. A., Filatov V. O. Intelligent technologies in medical diagnostics, treatment and rehabilitation: monograph. Vinnytsia: PP "TD "Edelweiss and K", 2019. 260 p.
17. Kozhem'yako V. P. Optical-electronic methods and tools for processing and analyzing biomedical images [monograph] / V. P. Kozhem'yako, S. V. Pavlov, K. I. Stanchuk. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2006 – 203 p.
18. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
19. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

Надійшла до редакції 15.11.2025р.

СОКОЛОВ АНДРІЙ – PhD, асистент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail:* andrii.sokolov@nure.ua

ДАЦОК ОЛЕГ – PhD, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail:* oleh.avrunin@nure.ua

НОСОВА ТЕТЯНА – PhD, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail:* tatyana.nosova@nure.ua

ЖЕМЧУЖКІНА ТЕТЯНА – PhD, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail:* tatyana.zhemchuzhkina@nure.ua

МЕЛЬНИК ВАЛЕНТИН – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail:* valentyn.melnyk@nure.ua

АВЕР'ЯНОВА ЛІЛІЯ – PhD, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail:* lilya.averyanova@nure.ua

АВРУНІН ОЛЕГ – д.т.н., професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, *e-mail:* oleh.avrunin@nure.ua

ANDRII SOKOLOV, OLEH DATSOK, TATYANA NOSOVA, TATYANA ZHEMCHUZHKINA,
VALENTYN MELNYK, LILIA AVERIANOVA, OLEG AVRUNIN

**BIOPHYSICAL SUBSTITUTION OF A MICROCONTROLLER MODULE FOR PERSONALIZED
TACTILE NAVIGATION SYSTEMS FOR PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS**

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv