

О. МАРМІТКО, С. ТИМЧИК

РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ПАТОЛОГІЙ ЗОРУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ МІКРОРУХІВ ОЧЕЙ

Предметом дослідження є розроблення та впровадження системи моніторингу стану здоров'я очей за допомогою сучасних технологій, зокрема бездротових сенсорних мереж, біометричних датчиків і програмного забезпечення для автоматичного виявлення захворювань зору. Особливу увагу приділено методам оброблення та аналізу показників із сенсорів для точної діагностики патологій, таких як катаракта, глаукома, діабетична ретинопатія тощо. **Мета роботи** – створення системи, яка дає змогу виявляти порушення зору в реальному часі, здійснювати автоматичну діагностику й надавати рекомендації щодо лікування. Система інтегрується з мобільним застосунком і може працювати разом з іншими медичними пристроями для полегшення взаємодії пацієнта й лікаря. **Завдання**, які необхідно виконати в статті: 1) розробити систему для збору й моніторингу інформації про стан здоров'я очей; 2) створити алгоритми оброблення й аналізу отриманої інформації; 3) розробити мобільний застосунок; 4) протестувати запропоновану систему. **Методи**, що застосовуються в дослідженні: аналіз інформації з біометричних сенсорів, алгоритми автоматичного порівняння показників з базою нормальних і патологічних значень та бездротові технології передачі даних (Bluetooth, Wi-Fi). Розроблена база даних і програмне забезпечення сприяють захищеному збереженню й аналізу медичних показників. **Досягнуті результати**. Дослідження продемонструвало, що система дає змогу контролювати стан зору в реальному часі з високою точністю (85–90 %), виявляти патології на ранніх стадіях і автоматично сповіщати пацієнта й лікаря про виявлені відхилення. Система демонструє ефективність у ранньому виявленні хвороб і дає змогу вчасно призначати лікування або додаткові обмеження. **Висновки**. Розроблена система є важливим кроком до інтеграції медичних технологій у повсякденне життя. Вона забезпечує вчасне виявлення порушень зору й зручний доступ до результатів моніторингу. У майбутньому можливе розширення функцій для виявлення інших захворювань очей та інтеграція з додатковими медичними пристроями для комплексного моніторингу здоров'я пацієнта.

Ключові слова: моніторинг зору; бездротові сенсорні мережі; розумні окуляри; автоматичне виявлення хвороб.

Вступ

Проблеми, пов'язані з органами зору, посідають одне з провідних місць серед хронічних захворювань і суттєво впливають на якість життя людини, обмежуючи її професійну, соціальну та повсякденну активність. Погіршення зору може призводити до зниження працездатності, обмеження можливостей для навчання, участі в соціальних і культурних заходах, а також до зростання ризику нещасних випадків у побуті й на роботі. За інформацією Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), понад 2,2 млрд людей у світі мають проблеми із зором, водночас приблизно 1 млрд випадків можна було б запобігти або успішно вилікувати за допомогою ранньої діагностики та відповідного лікування. Ця статистика свідчить про глобальну значущість проблеми й нагальну потребу в упровадженні ефективних методів моніторингу та профілактики захворювань очей.

Одними з найбільш поширених і серйозних очних захворювань є катаракта, глаукома, діабетична

ретинопатія, а також інші патології сітківки ока, які без вчасного виявлення можуть призводити до значного погіршення зору або навіть повної сліпоти. Такі патології не лише знижують якість життя, але й створюють суттєве навантаження на систему охорони здоров'я та економіку держави через потребу в тривалому лікуванні, хірургічних втручаннях і соціальній підтримці пацієнтів із порушенням зору. Тому раннє виявлення зазначених патологій, регулярне спостереження й постійний моніторинг стану зору є критично важливими для збереження здоров'я очей, запобігання тяжким ускладненням та зниженням соціально-економічних витрат, пов'язаних із лікуванням і адаптацією людей із порушенням зору.

Традиційні методи діагностики зорових функцій зазвичай передбачають фізичний візит до медичного закладу й використання спеціалізованого обладнання, такого як офтальмоскопи, периметри та інші діагностичні пристрої. Проте такі підходи можуть бути обмежені в досяжності для населення, особливо для мешканців віддалених, сільських або важкодоступних регіонів. Крім того, обмежена частота

планових оглядів, очікування черг і логістичні труднощі призводять до запізненого виявлення змін у стані зору, коли лікування стає більш складним, витратним і менш ефективним.

У зв'язку зі стрімким розвитком сучасних технологій і зростанням потреби в покращенні доступності медичних послуг з'являється нагальна необхідність у створенні інноваційних систем для моніторингу стану здоров'я очей. Такі системи мають забезпечувати дистанційний, безперервний і високоточний контроль за станом зору на основі передових технологічних рішень: бездротових сенсорних мереж, розумних пристроїв, алгоритмів оброблення інформації в реальному часі й методів штучного інтелекту. Впровадження подібних технологій дає змогу автоматично виявляти відхилення від нормальних показників, формувати попереджувальні повідомлення для користувача й медичного фахівця, а також вчасно реагувати на розвиток патологічних процесів.

Мета цього дослідження – розробити комплексну систему для моніторингу стану очей та раннього виявлення очних захворювань із застосуванням бездротових сенсорних мереж. Особливу увагу приділено використанню розумних окулярів із вбудованими сенсорами, здатними відстежувати зміни зору, фіксувати фізіологічні параметри користувача й автоматично передавати показники на мобільні пристрої. Інтеграція таких технологій із мобільними застосунками забезпечує можливість постійного моніторингу в режимі реального часу, автоматичний збір і аналіз даних, а також оперативне інформування пацієнта й лікаря про потенційні проблеми.

Запропонована система поєднує сучасні сенсорні технології, алгоритми оброблення й аналізу даних, інтуїтивний інтерфейс користувача та інтеграцію з мобільними пристроями, що допомагає підвищити ефективність ранньої діагностики, забезпечити доступність медичних послуг у будь-який час і в будь-якому місці, а також сприяє розвитку наукових досліджень і підвищенню практичної значущості моніторингу очних захворювань. Крім переліченого, така система відкриває нові перспективи для персоналізованої медицини, де спостереження за станом зору здійснюється індивідуально для кожного користувача з огляду на його фізіологічні особливості, стиль життя й умови навколишнього середовища.

Мета й завдання

Моніторинг здоров'я очей є одним із ключових складників сучасних медичних технологій, оскільки вчасне виявлення змін у стані зору дає змогу попередити розвиток серйозних офтальмологічних захворювань. До таких патологій належать катаракта, глаукома, діабетична ретинопатія, дегенерація сітківки та інші ураження очного апарату, які без ефективного контролю можуть призводити до значного погіршення зору або навіть сліпоти. Вчасна діагностика цих станів є критичною не лише для збереження гостроти зору, але й для підтримки високої якості життя пацієнтів, зменшення соціально-економічного навантаження на систему охорони здоров'я та підвищення загальної безпеки людини в повсякденній діяльності.

В умовах стрімкого розвитку бездротових сенсорних мереж, носимих пристроїв і мобільних технологій з'являється можливість створення інноваційних систем для моніторингу стану очей у режимі реального часу. Такі системи дають змогу автоматично відстежувати зміни зору, вчасно виявляти порушення на ранніх стадіях, а також надавати користувачам і медичним працівникам оперативні рекомендації щодо подальших дій. Використання сучасних алгоритмів оброблення та аналізу інформації допомагає зменшити вплив випадкових шумів, коригувати артефакти й порівнювати показники користувачів із базами даних нормальних і патологічних значень, що стрімко підвищує точність діагностики.

Мета дослідження – розроблення комплексної системи для бездротового моніторингу стану очей, яка використовує розумні окуляри із вбудованими сенсорами для автоматичного збору інформації про стан зорових функцій. Система призначена для виявлення таких змін, як зниження гостроти зору, поява ореолів, плям або затемнень у полі зору, які можуть свідчити про розвиток серйозних офтальмологічних захворювань. Важливим аспектом є здатність системи передавати інформацію в реальному часі на мобільні пристрої користувача, а також забезпечувати їх надійне збереження, оброблення та аналіз для подальшого застосування в консультаціях з лікарем.

Основною метою дослідження є створення технології бездротового моніторингу стану очей із використанням розумних окулярів, оснащених

сенсорами для фіксації змін зору й передачі показників за допомогою Bluetooth або Wi-Fi на мобільні пристрої. Ключовим аспектом є інтеграція цієї технології в мобільні застосунки, які забезпечують пацієнта й медичного фахівця зручним інтерфейсом для отримання результатів вимірювань, формування звітів і надання рекомендацій щодо подальших дій. Така інтеграція дає змогу здійснювати безперервний моніторинг стану зору, аналізувати динаміку змін і вчасно реагувати на потенційно небезпечні симптоми.

У межах цього дослідження передбачено розв'язання низки завдань:

- розроблення системи збору й моніторингу інформації про стан здоров'я очей із використанням сенсорів, вбудованих у розумні окуляри або інші носимі пристрої, для забезпечення безперервного й точного вимірювання показників зору;

- створення алгоритмів оброблення й аналізу отриманих показників для автоматичного виявлення змін у зорових функціях, які можуть свідчити про наявність патологій. Це передбачає фільтрацію шумів, нормалізацію сигналів, корекцію артефактів і порівняння з базою даних нормальних і патологічних показників;

- розроблення мобільного застосунку для зберігання історії вимірювань і доступу до результатів моніторингу в реальному часі. Застосунок дає змогу відстежувати динаміку змін стану зору користувачів, формувати аналітичні звіти, забезпечувати інтерфейс для взаємодії з лікарем і надсилати нагадування про необхідність перевірки зору;

- тестування розробленої системи для оцінювання її точності, надійності та ефективності в реальних умовах експлуатації. Це передбачає перевірку здатності системи точно виявляти зміни зору, правильно інтерпретувати результати й надавати коректні рекомендації користувачам і медичним працівникам.

Дослідження також передбачає проведення експериментальних випробувань для перевірки працездатності системи та підтвердження її ефективності в ранньому виявленні патологій. Очікується, що впровадження такої технології підвищить ефективність моніторингу стану очей, сприятиме вчасній медичній допомозі, зменшенню ризику прогресування серйозних захворювань органів зору, а також відкриє нові перспективи для розвитку персоналізованої офтальмологічної медицини, де спостереження за станом зору здійснюється

індивідуально для кожного користувача з огляду на його фізіологічні особливості та спосіб життя.

Аналіз останніх публікацій

У сучасних системах моніторингу стану здоров'я очей особливу увагу приділяють не лише збору інформації, а і її високоточному та вчасному аналізу. Це є критично важливим, оскільки раннє виявлення змін у зорових функціях дає змогу запобігти розвитку серйозних офтальмологічних захворювань, таких як катаракта, глаукома, діабетична ретинопатія або дегенеративні зміни сітківки. Вчасна діагностика підвищує ефективність профілактичних заходів, допомагає призначити ефективне лікування та зменшити ризик ускладнень.

Сучасні дослідники пропонують комплексні підходи до створення таких систем, активно інтегруючи технології штучного інтелекту, мобільні платформи й сенсорні пристрої. Завдяки штучному інтелекту й методам машинного навчання можна автоматично аналізувати великі масиви даних про стан зору, виявляти приховані закономірності та прогнозувати розвиток патологій. Мобільні платформи допомагають реалізувати дистанційне спостереження, надаючи користувачам і медичним фахівцям актуальну інформацію в режимі реального часу.

Сенсорні пристрої, зокрема високоточні датчики руху очей, оптичні сенсори й біометричні модулі, забезпечують безперервний збір фізіологічних і оптичних параметрів ока. Поєднання таких технологій створює можливість для автоматизованого й персоналізованого контролю за станом зору, зменшуючи залежність від частих відвідувань клінік і підвищуючи доступність медичної допомоги. Завдяки цьому сучасні системи моніторингу зору стають ефективним інструментом ранньої діагностики, профілактики та підтримки здоров'я очей у повсякденному житті. Автори роботи [1] досліджують застосування глибоких нейронних мереж для автоматичного прогнозування рефракційних помилок за допомогою зображень очного дна. Упровадження цього підходу сприяє досягненню високої точності діагностики та може бути інтегроване в мобільні застосунки для моніторингу зору в реальному часі. Така технологія підвищує ефективність раннього виявлення патологій і забезпечує вчасну профілактику офтальмологічних захворювань.

У праці [2] запропоновано розроблення мобільного пристрою для офтальмологічного огляду, який допомагає здійснювати офтальмоскопію в польових умовах із використанням стандартних мобільних технологій. Дослідження демонструє ефективність дистанційного моніторингу зору й потенціал для впровадження подібних рішень у системи, що дають змогу користувачам контролювати стан очей за допомогою смартфонів.

Автори роботи [3] розглядають методи автоматичного стеження за рухом зіниць (*eye-tracking*), які можуть бути застосовані для дистанційного моніторингу зору. Використання алгоритмів аналізу руху зіниць дає змогу створювати інтерактивні системи для діагностики, що здатні виявляти порушення на ранніх етапах розвитку патологій, підвищуючи точність і оперативність моніторингу.

У публікації [4] описано систему, що інтегрує сенсори й мобільні платформи для вимірювання різних показників здоров'я, зокрема зорові функції. Така система може бути адаптована для дистанційного моніторингу зору із використанням мобільних застосунків для збору інформації та віддаленого контролю, що робить спостереження доступним у будь-який час і в різних умовах.

У роботі [5] проаналізовано методи застосування штучного інтелекту для скринінгу офтальмологічних захворювань, зокрема діабетичної ретинопатії, яка є одним із найбільш поширених патологій, що негативно впливають на зір. Результати цього дослідження демонструють потенціал інтеграції AI в системи моніторингу для раннього виявлення патологій очей, що значно підвищує ефективність профілактичних заходів і дає змогу лікарям оперативно реагувати на зміни в стані пацієнта.

У дослідженні [6] описано використання спеціалізованого програмного забезпечення для підвищення точності діагностики в офтальмології. Комплекс забезпечує автоматизований аналіз зображень очного дна й визначає наявність захворювань із високою точністю, що є важливим аспектом у створенні систем постійного моніторингу стану зору. Упровадження подібних технологій допомагає ефективно відстежувати динаміку змін у стані очей, вчасно виявляти розвиток захворювань і надавати рекомендації для лікування або додаткових обстежень.

У роботі [7] розглянуто застосування *eye-tracking* у поєднанні з алгоритмами глибокого

навчання для раннього виявлення діабетичної ретинопатії. Використання цього підходу дає змогу визначати зміни зору на ранніх стадіях та інтегрувати технологію в мобільні або носимі системи моніторингу, підвищуючи точність і вчасність діагностики.

Автори публікації [8] пропонують інтелектуалізовану систему оцінювання динамічних змін біомедичних зображень, яка автоматично обробляє і аналізує медичні показники. Така технологія може бути застосована для дистанційного моніторингу стану очей і створення систем відстеження змін зорових функцій у реальному часі.

У роботі [9] описано багатофункціональні гнучкі контактні лінзи із вбудованими сенсорами для моніторингу стану очей. Ця розробка демонструє потенціал інтеграції біосенсорів у носимі пристрої для постійного відстеження фізіологічних параметрів і зорових функцій, що розширює можливості сучасних систем мобільного моніторингу.

Дослідження [10] присвячено медико-організаційним підходам до оптимізації спостереження за порушенням зору в школярів. Автори наголошують на важливості організаційних і технологічних рішень для систематичного збору інформації про стан очей у дітей, що може бути основою для впровадження моніторингових систем у навчальних закладах.

У праці [11] запропоновано гібридну архітектуру для аналізу контекстних параметрів руху очей з метою ефективної діагностики різних патологій. Використання такого підходу дає змогу підвищити точність класифікації захворювань та інтегрувати його в системи моніторингу для раннього виявлення офтальмологічних проблем.

Автори дослідження [12] пропонують метод аналізу електроретинограмів для підвищення інформативності систем діагностики стану сітківки. Метод сприяє більш точному оцінюванню стану зорових функцій та підвищенню ефективності автоматизованих систем моніторингу очей.

Працю [13] присвячено використанню цифрових показників руху очей (DEMOs) як біомаркерів для виявлення неврологічних станів. Результати дослідження підтверджують потенціал застосування подібних показників у системах моніторингу для раннього виявлення зорових і неврологічних порушень.

У дослідженні [14] описано системи візуального моніторингу в медицині та їх застосування для відстеження стану зору. Робота демонструє

ефективність інтеграції сенсорних технологій і програмного забезпечення для автоматичного збору інформації та підтримки медичної діагностики.

Автори праці [15] запропонували високощільну напівсферично вигнуту матрицю зображення на основі гетероструктури MoS_2 -графен, яка надихається людським оком. Ця м'яка оптоелектронна система здатна детектувати оптичні сигнали та здійснювати електричну стимуляцію зорового нерва з мінімальними механічними навантаженнями на сітківку. Використання атомно тонких матеріалів і розрахунків методом скінченних елементів підтверджує ефективність запропонованої конструкції.

Опис системи моніторингу стану здоров'я очей

Запропонована система передбачає використання спеціальних розумних окулярів із вбудованими сенсорними датчиками, які забезпечують безперервний та автоматизований моніторинг стану очей користувача. Сенсорні модулі окулярів здатні збирати широкий спектр параметрів зору, зокрема рухи очей (*eye-tracking*), фокусна здатність, рівень освітленості, розпізнавання ореолів або затемнень у полі зору, а також інші фізіологічні показники, що можуть сигналізувати про ранні ознаки очних захворювань.

Окуляри оснащені модулем бездротової передачі інформації (Bluetooth або Wi-Fi), що дає змогу оперативно надсилати зібрані показники на мобільний пристрій користувача – смартфон, планшет або інший сумісний гаджет. На мобільному пристрої встановлений спеціалізований застосунок, що виконує автоматичне оброблення отриманих показників за допомогою алгоритмів штучного інтелекту й сучасних методів оброблення сигналів. Застосунок оцінює стан очей користувача, виявляє потенційні відхилення від

нормальних показників і надає зрозумілі повідомлення з рекомендаціями, наприклад звернутися до лікаря або пройти додаткове обстеження.

Система забезпечує постійне відстеження змін у стані очей, що дає змогу вчасно виявляти ранні симптоми таких захворювань, як катаракта, глаукома, діабетична ретинопатія, дегенерація сітківки тощо. Крім того, вона веде детальну історію стану зору користувача, що допомагає здійснювати довгостроковий моніторинг, аналізувати динаміку змін і забезпечувати персоналізовані рекомендації на основі накопиченої інформації.

Схему функціональних модулів системи моніторингу стану здоров'я очей подано на рис. 1. Вона містить такі основні компоненти:

- датчики окулярів для збору параметрів зору й фізіологічних показників користувача;
- модуль бездротової передачі інформації, що забезпечує швидку й надійну синхронізацію інформації з мобільним застосунком;
- мобільний застосунок для автоматичного аналізу, оброблення та візуалізації показників, формування звітів і рекомендацій;
- система повідомлень користувача, яка інформує про виявлені відхилення, надає поради щодо профілактичних дій або необхідності консультації лікаря.

Така архітектура дає змогу створити інтегроване й зручне у використанні рішення для регулярного контролю за станом очей у будь-яких умовах – вдома, на роботі або під час подорожей. Упровадження подібної системи підвищує ефективність раннього виявлення офтальмологічних патологій, сприяє вчасній профілактиці захворювань і допомагає користувачу контролювати стан зору в реальному часі, не відвідуючи медичний заклад.



Рис. 1. Схема функціональних модулів системи моніторингу стану здоров'я очей

Система сенсорних окулярів

Датчики, інтегровані в розумні окуляри, призначені для виявлення широкого спектра змін у зорі, зокрема зниження його гостроти, поява

ореолів, плям, затемнень у полі зору або порушення концентрації погляду. Такі симптоми можуть бути ранніми ознаками розвитку серйозних очних захворювань, серед яких катаракта, глаукома, діабетична ретинопатія, дегенерація сітківки,

запальні процеси або травматичні ушкодження ока. Для вчасного виявлення патологій система здійснює автоматичне зіставлення отриманих результатів із великою базою нормальних і патологічних параметрів, що дає змогу визначати відхилення від стандартних значень, оцінювати ризики розвитку захворювань і прогнозувати їх потенційний прогрес.

Основу системи становлять високоточні сенсори відстеження руху очей (*eye-tracking sensors*), які використовують інфрачервоні камери й спеціальні джерела світла для фіксації положення та руху зіниці щодо ока й голови користувача. Завдяки цьому можна оцінювати координату рухів очей, концентрацію погляду, швидкість реакції на візуальні стимули, а також виявляти аномалії в роботі очних м'язів, що свідчать про нейрологічні або офтальмологічні проблеми.

Оптичні сенсори аналізують властивості світла, яке відбивається від сітківки, рогівки та кришталика. Це допомагає оцінювати фокусування зорового апарату, прозорість оптичних середовищ ока й виявляти непрозорі утворення, властиві для катаракти або інших захворювань. Застосування таких сенсорів забезпечує високоточне вимірювання параметрів зору без необхідності інвазивних процедур, що робить моніторинг комфортним і безпечним для користувача.

Біометричні сенсори додатково відстежують загальний фізіологічний стан пацієнта, а саме: пульс, температуру тіла, тиск і рухи голови. Це дає змогу системі брати до уваги зовнішні фактори й фізіологічні коливання, які можуть впливати на результати вимірювань, підвищуючи точність, надійність та індивідуалізацію діагностики.

Зібрані показники автоматично передаються на смартфон користувача за допомогою бездротових каналів зв'язку, такі як Bluetooth або Wi-Fi. Мобільний застосунок аналізує інформацію, порівнює її з базою даних нормальних і патологічних показників, формує детальні звіти про стан зору й надає пацієнтові зрозумілі рекомендації. Це може бути попередження про відхилення, поради щодо профілактичних заходів, а також рекомендація звернутися до офтальмолога для подальшого обстеження або лікування.

Поєднання сенсорних технологій, оптичного та біометричного контролю, а також алгоритмів оброблення інформації та штучного інтелекту забезпечує всебічний моніторинг стану очей у реальному часі. Така система не лише дає змогу

на ранньому етапі виявити патологію, але й відстежити динаміку змін зору, проаналізувати ефективність лікування й профілактики, підвищуючи загальну результативність охорони здоров'я очей та якість життя користувачів.

Опис програмного забезпечення

Розроблений алгоритм оброблення інформації із сенсорних окулярів побудований на принципі порівняння отриманих показників із великою базою даних нормальних і патологічних значень. Після прийому інформації від сенсорів – *eye-tracking*, оптичних і біометричних – алгоритм виконує багаторівневе попереднє оброблення сигналів. Цей етап передбачає:

- фільтрацію шумів для усунення електронних і механічних перешкод, що виникають під час збору показників;
- нормалізацію сигналів, що забезпечує порівняність показників між різними користувачами й умовами вимірювання;
- усунення артефактів, викликаних рухами очей, морганням або зміною умов освітлення.

Такі процедури забезпечують високу точність аналізу й мінімізують вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань, що критично для вчасного виявлення ранніх ознак офтальмологічних захворювань.

На наступному етапі система формує індивідуальний профіль стану зору користувача, який містить ключові параметри: гостроту зору, наявність ореолів, плям або затемнень, а також показники руху очей і фізіологічні параметри (пульс, температура, рухи голови). Алгоритм автоматично зіставляє отриману інформацію з патернами, що зберігаються в базі даних патологій. Це дає змогу:

- визначати наявність або відсутність ознак конкретних захворювань, таких як катаракта, глаукома, діабетична ретинопатія, дегенеративні зміни сітківки, запальні або травматичні ураження;
- попередньо прогнозувати розвиток патологій на основі аналізу динаміки показників;
- адаптувати порогові значення оцінки для конкретного користувача, беручи до уваги історію вимірювань та індивідуальні особливості зорового апарату.

Для підвищення точності діагностики алгоритм застосовує методи машинного навчання, зокрема класифікаційні та прогнозні моделі, які дають змогу

визначати тенденції змін зору та прогнозувати ймовірність розвитку захворювань у майбутньому. Це особливо важливо для раннього виявлення прогресуючих станів, таких як глаукома або діабетична ретинопатія, що на початкових стадіях можуть не виявлятися очевидними симптомами.

На виході алгоритм формує структуровані та зрозумілі повідомлення для користувача й лікаря, що передбачають:

- інформацію про виявлені відхилення;
- можливу патологію, що спричиняє відхилення;
- рекомендації щодо подальших дій, наприклад

консультація офтальмолога, додаткові обстеження або повторні вимірювання після певного проміжку часу.

Завдяки такому комплексному підходу система забезпечує безперервне, автоматизоване і вчасне виявлення змін стану зору, спираючись на порівняння з достовірною інформацією про патології. Це підвищує як наукову значущість, так і практичну цінність запропонованої технології, робить її ефективним інструментом для ранньої діагностики, постійного моніторингу та профілактики офтальмологічних захворювань.

Мобільний застосунок

Мобільний застосунок для моніторингу стану очей створено для платформи *Android* із потенційною можливістю адаптації під *iOS* і з використанням середовища розроблення *Android Studio* та мови програмування *Kotlin*. Для забезпечення оброблення показників у реальному часі застосовано багатопотокові процеси, що дають змогу одночасно отримувати інформацію від сенсорів окулярів і виконувати її аналіз без затримок і переривань. Такий підхід гарантує плавну роботу застосунку навіть за великих обсягів інформації та високої частоти оновлення показників.

Застосунок отримує інформацію від сенсорних окулярів через бездротові інтерфейси *Bluetooth* та *Wi-Fi*, що забезпечує стабільну синхронізацію та надійну передачу показників, мінімізуючи втрати пакетів даних і затримки у відтворенні результатів. Для підвищення надійності застосовано механізми повторної передачі та буферизації інформації, що допомагає забезпечити безперервність моніторингу навіть у разі тимчасових перерв у з'єднанні.

Інтерфейс користувача розроблено з використанням *XML* для розмітки екранів та сучасних елементів *Material Design*. Це забезпечує інтуїтивне управління,

зручну навігацію та швидкий доступ до основних функцій застосунку, таких як перегляд стану зору, історії вимірювань і повідомлень про відхилення. Для локального зберігання інформації використовується *SQLite*, що дає змогу вести архів вимірювань без доступу до інтернету. Для хмарного зберігання та синхронізації застосовано *Firebase Realtime Database*, що допомагає відстежувати динаміку змін стану зору користувача та надавати лікарю або медичному персоналу доступ до актуальної інформації в режимі реального часу.

Для оброблення медичних показників розроблено власні алгоритми на *Kotlin*, які порівнюють результати з базою нормальних і патологічних значень. Алгоритми аналізують зміни в зорових функціях, формують попередні висновки та готують повідомлення для користувача або лікаря. Для підвищення безпеки та конфіденційності інформації реалізовано механізми її шифрування, управління доступом і автентифікації користувачів, що забезпечує захист персональної медичної інформації відповідно до сучасних стандартів безпеки, разом з *GDPR*- та *HIPAA*-подібними вимогами.

Застосунок має модульну архітектуру, що дає змогу легко додавати нові функції та підтримувати сумісність із різними моделями сенсорних окулярів. Це забезпечує масштабованість системи й можливість інтеграції додаткових методів аналізу інформації в майбутньому, зокрема алгоритмів машинного навчання для прогнозування змін зору або раннього виявлення патологій на основі динаміки показників.

Схему взаємодії компонентів програмного забезпечення, що демонструє потік інформації від сенсорів окулярів до мобільного застосунку й хмарного сховища, подано на рис. 2. Вона містить такі модулі:

- збір інформації – прийом сигналів від *eye-tracking*, оптичних і біометричних сенсорів;
- оброблення сигналів – попередня фільтрація, нормалізація, корекція артефактів;
- формування профілю користувача – індивідуальні параметри стану зору й фізіологічні параметри;
- генерація повідомлень – формування зрозумілих результатів і рекомендацій для користувача й лікаря;
- зберігання та синхронізація – локальна база *SQLite* та хмарна база *Firebase* для архівування та віддаленого доступу.

Така архітектура забезпечує комплексний та інтегрований підхід до моніторингу стану очей, поєднуючи високоточний збір показників, надійне оброблення, зручний інтерфейс і безпечне зберігання

медичної інформації, що робить систему ефективним інструментом для постійного й дистанційного контролю за здоров'ям очей.

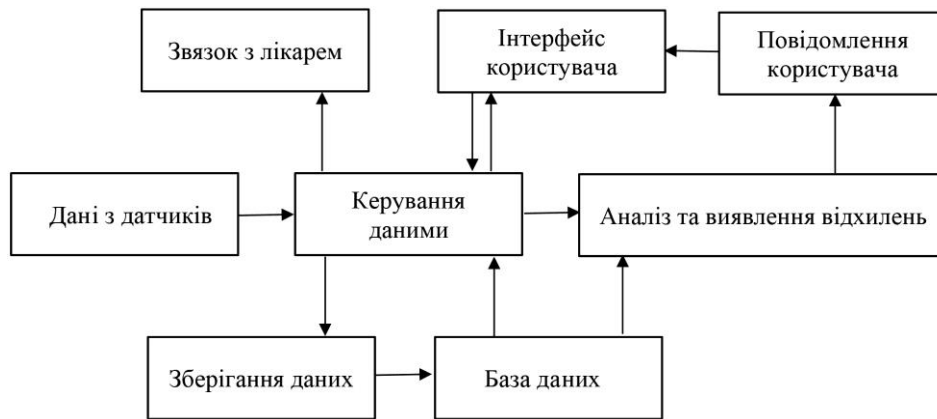


Рис. 2. Схема взаємодії компонентів програмного забезпечення

Результати

Основна мета проведеного експерименту – комплексно оцінити ефективність і точність розробленої системи моніторингу зору на основі сенсорних окулярів у виявленні найбільш поширених офтальмологічних захворювань, таких як катаракта, глаукома та діабетична ретинопатія. Експеримент також передбачав визначення продуктивності системи в реальних умовах використання, оцінювання стабільності роботи алгоритмів і здатності до вчасного виявлення змін у стані зору користувачів. Особливу увагу приділено можливості системи виявляти ранні симптоми захворювань, що дає змогу вчасно реагувати й проводити профілактичні або лікувальні заходи.

Під час експерименту система була протестована на групі пацієнтів різного віку, статі та з різним рівнем тяжкості зазначених захворювань, що допомогло всебічно оцінити роботу алгоритмів у різноманітних клінічних умовах. Такий підхід дав змогу брати до уваги індивідуальні особливості пацієнтів, зокрема анатомічні відмінності очей, наявність супутніх патологій та інші фізіологічні фактори, які можуть впливати на точність вимірювань.

Для аналізу результатів використовувалися стандартні медичні метрики, зокрема точність і чутливість, що допомагають порівняти автоматизовану діагностику з результатами класичних медичних обстежень. Зокрема як контрольні методи застосовували офтальмоскопію для огляду сітківки та рогівки,

тонографію для оцінювання внутрішньоочного тиску, а також оптичну когерентну томографію (ОСТ), що забезпечує детальну візуалізацію структур ока. Упровадження таких порівняльних методів дало змогу отримати об'єктивну оцінку ефективності сенсорних окулярів і підтвердити достовірність автоматизованих результатів.

Після завершення тестування зібрано основні показники ефективності й точності (див. табл. 1).

Таблиця 1. Результати дослідження

Номер дослідження	Точність діагностики (катаракта), %	Точність діагностики (глаукома), %	Точність діагностики (ретинопатія), %
1	95	90	98
2	92%	85%	89%
3	93%	96%	90%
4	98%	92%	88%
5	89%	87%	95%
6	91%	94%	96%

Аналіз отриманої інформації показав, що система продемонструвала високий рівень точності діагностики для всіх трьох захворювань. Найвищу точність виявлення мала катаракта із середнім показником 94%, що свідчить про надійність алгоритмів у розпізнаванні цього захворювання. Дещо нижчий рівень точності спостерігався для глаукоми, середній показник якої становить 91%, а для діабетичної ретинопатії – 93%. Виявлені незначні відхилення в точності діагностики для окремих пацієнтів, особливо в разі глаукоми (85–96%), можуть бути пов'язані з індивідуальними

особливостями пацієнтів, такими як анатомічні відмінності очей, а також із впливом факторів зовнішнього середовища під час тестування. Ці результати свідчать про те, що, попри високий загальний рівень точності, існує потенціал для подальшого вдосконалення алгоритмів системи, зокрема завдяки оптимізації оброблення інформації та підвищення адаптивності моделей до різних умов використання. Отримані результати підтверджують, що розроблена система сенсорних окулярів є ефективним інструментом для автоматизованого моніторингу стану зору, що дає змогу вчасно виявляти зміни й потенційні патології, сприяючи підвищенню якості медичної діагностики та ранньому втручанню в разі очних захворювань.

Незважаючи на високий загальний рівень точності діагностики, результати експерименту вказують на наявність певних обмежень і потенційних недоліків системи моніторингу зору на основі сенсорних окулярів. Ці обмеження пов'язані як із характеристиками сенсорних технологій, так і з особливостями алгоритмів оброблення інформації та реальними умовами використання.

По-перше, спостерігаються коливання точності в разі виявлення глаукоми, де показники варіюють від 85% до 96%. Це свідчить про вплив індивідуальних особливостей пацієнтів, таких як анатомічні відмінності очей, форма зіниці, товщина рогівки та інші фізіологічні фактори, на ефективність алгоритмів. В окремих випадках ці фактори можуть знижувати точність автоматизованого виявлення патології, особливо на ранніх стадіях захворювання, коли симптоми не значні та їх важко зафіксувати сенсорами.

По-друге, зовнішні умови тестування, зокрема рівень освітленості, рухи голови, моргання пацієнта або інші непередбачувані фактори довкілля, можуть впливати на якість сигналів від сенсорів і, відповідно, на результати аналізу. Це наголошує на необхідності подальшого вдосконалення фільтрів оброблення інформації, алгоритмів компенсації артефактів і впровадження механізмів самокорекції для зменшення впливу зовнішніх факторів на точність діагностики.

По-третє, система демонструє певні обмеження в процесі діагностики діабетичної ретинопатії та катаракти в пацієнтів із нестандартними або складними клінічними випадками. Хоча середні показники точності залишаються високими (93–94%), окремі результати демонструють незначні відхилення, що свідчить про потенціал для інтеграції

додаткової інформації або більш складних методів оброблення, таких як алгоритми глибокого навчання, мультипараметричний аналіз і поєднання різних сенсорних сигналів для підвищення точності в складних випадках.

По-четверте, на цьому етапі система орієнтована переважно на визначення конкретних захворювань і не забезпечує комплексну оцінку всіх можливих офтальмологічних патологій, таких як дегенеративні зміни сітківки, запальні процеси або травматичні ушкодження ока. Це обмежує її універсальність і вимагає подальшого розроблення, масштабування алгоритмів і розширення бази даних патологій для забезпечення більш комплексного моніторингу стану зору.

З огляду на зазначені обмеження доцільно впроваджувати адаптивні алгоритми, що беруть до уваги індивідуальні особливості користувачів, підвищувати стійкість сенсорів до зовнішніх факторів, розширювати базу даних патологій і застосовувати методи прогнозування змін зору на основі аналізу динаміки показників. Такі вдосконалення дають змогу підвищити ефективність і надійність системи в реальних умовах експлуатації та забезпечити більш точне раннє виявлення широкого спектра офтальмологічних захворювань.

Висновки

Розроблено комплексну систему для моніторингу стану здоров'я очей, основу на розумних окулярах із вбудованими сенсорами й бездротовою передачею інформації. Система забезпечує автоматичний і безперервний збір ключових показників про стан зору користувача: гострота, рухи очей, оптичні характеристики рогівки та сітківки, а також фізіологічні параметри, такі як пульс, температура тіла й рухи голови. Ця інформація передається на мобільний застосунок, що допомагає користувачам і лікарям оперативно отримувати результати моніторингу й приймати обґрунтовані рішення щодо необхідності медичного втручання.

У системі реалізовано алгоритми оброблення та аналізу інформації, які автоматично порівнюють показники зорових функцій із великою базою нормальних і патологічних значень. Такий підхід дає змогу вчасно виявляти ранні зміни в стані зору, що можуть свідчити про розвиток таких захворювань, як катаракта, глаукома, діабетична ретинопатія,

дегенеративні зміни сітківки, запальні процеси або травматичні ушкодження ока. Алгоритми працюють у режимі реального часу й демонструють високу точність діагностики – середня точність оцінки для різних захворювань коливається в межах 91–94%, що підтверджує надійність і практичну ефективність системи.

Для зберігання та оброблення результатів створено спеціалізовану базу медичної інформації з метою відстеження історії змін стану зору користувача. Це уможливило аналіз динаміки розвитку патологій, допомагає лікарям отримувати актуальну інформацію для консультацій, прогнозувати прогресування захворювань і приймати обґрунтовані клінічні рішення. Для забезпечення конфіденційності та безпеки персональних показників реалізовано їх шифрування, контроль доступу й автентифікацію користувачів, що відповідає сучасним стандартам захисту медичної інформації, зокрема GDPR і HIPAA.

Систему експериментально оцінено в реальних умовах використання. Тестування показало високий рівень точності діагностики й здатність системи вчасно виявляти зміни в зорових функціях користувачів. Незначні відхилення в точності для

окремих захворювань свідчать про потенціал подальшого вдосконалення алгоритмів, зокрема способом інтеграції адаптивних методів оброблення інформації та алгоритмів машинного навчання, що сприятиме підвищенню ефективності й надійності системи в процесі моніторингу широкого спектра офтальмологічних патологій.

Розроблена система також передбачає масштабованість та інтеграцію нових технологій: можливість під'єднання додаткових сенсорів, адаптацію алгоритмів для різних типів користувачів, зокрема дітей і літніх людей, а також інтеграцію з електронними медичними картками для централізованого обліку інформації.

Отже, система забезпечує комплексний та інтегрований підхід до автоматизованого моніторингу стану очей, поєднуючи високоточні сенсорні технології, алгоритми аналізу показників у реальному часі, безпечне зберігання інформації та можливість дистанційного спостереження. Це підвищує як практичну цінність, так і наукову значущість запропонованого рішення, створюючи ефективний інструмент для ранньої діагностики, моніторингу й профілактики очних захворювань.

References

1. Sorrentino, F. S., et al. (2024), "Novel Approaches for Early Detection of Retinal Diseases Using Artificial Intelligence", *Journal of Personalized Medicine*, 14(7), 690 p. DOI:10.3390/jpm14070690
2. Parmar, U. P. S., et al. (2024), "Artificial Intelligence (AI) for Early Diagnosis of Retinal Diseases", *Medicina*, 60(4), 527 p. DOI:10.3390/medicina60040527
3. Solomin, A. V., Kovalenko, M. V. (2020), "Automated system for pupil tracking" ["Avtomatyzovana systema stezhennia za zinytsyamy ochei"], *Biomedical Engineering and Technology*, (3), P. 25–29. DOI: 10.20535/2617-8974.2020.3.195134
4. Sedinkin O. A., Derkach M. V., Skarga-Bandurova I. S., Matyuk D. S. (2024), "Eye tracking system based on machine learning" ["Systema vidstezhennia pohliadu na osnovi mashynnoho navchannia"], *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (55), P. 199–205. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2024-55-25
5. Ostrovska, K. Y., Porokhnyavyy, V. H. (2025), "Research of neural network models for gaze tracking and object fixation" ["Doslidzhennia neironetkovykh modelei dlia vidstezhennia pohliadu ta fiksatsii ob'ektiv"], *Systemni tekhnologii*, 2(157), P. 170–178. DOI: 10.34185/1562-9945-2-157-2025-17
6. Zaporozhets A. O., Verpeta V. O., Pluto I. V., Komisarenko Yu. I., Pavlenko Yu. R. (2012), "Development of DIOLAS software package for diagnostics in ophthalmoscopy" ["Rozrobka prohramnoho kompleksu DIOLAS dlia diahnostyky v oftalmoskopii"], *Science-Based Technologies*, 14(2), P. 114–118. DOI: 10.18372/2310-5461.14.5104
7. Jiang, H., et al. (2023), "Eye tracking based deep learning analysis for the early detection of diabetic retinopathy: A pilot study", *Biomedical Signal Processing and Control*, 84, 104830 p. DOI: 10.1016/j.bspc.2023.104830
8. Golikov M. S., Donets V. V., Strilets V. Ye. (2025), "Intelligent analysis of optical images based on a hybrid approach" ["Intelektualnyi analiz optychnykh zobrazhen na osnovi hibraydnogo pidkholdu"], *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*, 1(13), P. 83–87. DOI: 10.20998/2079-0023.2025.01.12
9. Xie, M., et al. (2022), "Multifunctional flexible contact lens for eye health monitoring using inorganic magnetic oxide nanosheets", *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1). DOI: 10.1186/s12951-022-01415-8
10. Reshetnyak V. V., For E. E. (2024), "Eye tracking as a tool for researching user behavior" ["Vidstezhennia pohliadu yak instrument doslidzhennia povedinky korystuvachiv"], *Computer-integrated technologies: education, science, production*, 55, P. 181–190. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2024-55-23
11. El Hmimdi, A. E., Palpanas, T., Kapoula, Z. (2024), "Efficient diagnostic classification of diverse pathologies through contextual eye movement data analysis with a novel hybrid architecture", *Scientific Reports*, 14, 21461 p. DOI: 10.1038/s41598-024-68056-9

12. Andrushchenko M. A., Selivanova K. G. (2024), "Prospects of diagnosing movement disorders using computer vision methods on a mobile device" ["Perspektyvy diahnozy rukhovyykh rozladiv za dopomohoiu metodiv kompiuternoho zoru na bazi mobilnogo prystroiu"], *Opt.-el. inf.-enerh. tekhn.*, 48(2), P. 96–103. DOI: 10.31649/1681-7893-2024-48-2-96-103
13. Graham, L., et al. (2024), "Digital Eye-Movement Outcomes (DEMOs) as Biomarkers for Neurological Conditions: A Narrative Review", *Big Data and Cognitive Computing*, 8 (12), 198 p. DOI: 10.3390/bdcc8120198
14. Ivaskevych D. R., Popov A. A., Rizun V. S., Gavrylets Yu. P., Petrenko-Lysak A. O., Yachnyk Yu. O., Tukaev S. I. (2023), "Age-related differences in fixation gaze length while reading the news with negative text elements" ["Vikovi vidminnosti v tryvalosti fiksatsii pohliadu pid chas chytannia novyn z nehatyvnyimi elementamy tekstu"], *East European Journal of Psycholinguistics*, 10(1), P. 36–47. DOI: 10.29038/eejpl.2023.10.1.iva
15. Choi, C., et al. (2017), "Human eye-inspired soft optoelectronic device using high-density MoS₂-graphene curved image sensor array", *Nature Communications*, 8(1). DOI: 10.1038/s41467-017-01824-6

Received (Надійшла) 16.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.11.2025

Publication date (Дата публікації) 28.12.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Мормітко Олексій Михайлович – Вінницький національний технічний університет, аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінниця, Україна; e-mail: alexchrist1488@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-0601-6238>

Тимчик Сергій Васильович – кандидат технічних наук, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінниця, Україна; e-mail: tymchysv@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2977-1602>; Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55225643900>

Mormitko Oleksiy – Vinnytsia National Technical University, Postgraduate Student, Department of Biomedical Engineering and Opto-Electronic Systems, Vinnytsia, Ukraine.

Tymchyk Serhiy – PhD (Engineering Sciences), Vinnytsia National Technical University, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering and Opto-Electronic Systems, Vinnytsia, Ukraine.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR EARLY DETECTION OF VISION PATHOLOGIES BASED ON ANALYSIS OF EYE MICROMOVEMENT

The **subject** of the research is the development and implementation of an eye health monitoring system using modern technologies, in particular wireless sensor networks, biometric sensors and software for automatic detection of vision diseases. Special attention is paid to methods of processing and analyzing data from sensors for accurate diagnosis of pathologies such as cataracts, glaucoma, diabetic retinopathy and other eye diseases. **The aim** of the work is to create a system that allows detecting visual impairments in real time, performing automatic diagnostics and providing treatment recommendations. The system integrates with a mobile application and can work together with other medical devices to facilitate patient-doctor interaction. **The tasks** solved in the article: 1) develop a system for collecting and monitoring eye health data; 2) create algorithms for processing and analyzing the obtained data; 3) develop a mobile application; 4) test the developed system. **Methods** used in the study: data analysis from biometric sensors, algorithms for automatic comparison of indicators with a database of normal and pathological values, and wireless data transmission technologies (Bluetooth, Wi-Fi). The developed database and software provide secure storage and analysis of medical data. **Results.** The results of the study showed that the system allows monitoring the state of vision in real time with high accuracy (85–90%), detecting pathologies in the early stages and automatically notifying the patient and doctor about detected deviations. The system demonstrates effectiveness in early detection of diseases and allows for timely prescribing of treatment or additional examinations. **Conclusions.** The developed system is an important step towards integrating medical technologies into everyday life. It provides timely detection of vision disorders and convenient access to monitoring results. In the future, it is possible to expand the functions to detect other eye diseases and integrate with additional medical devices for comprehensive monitoring of the patient's health.

Keywords: vision monitoring; wireless sensor networks; smart glasses; automatic disease detection.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мормітко О. М., Тимчик С. В. Розроблення інтелектуальної системи раннього виявлення патологій зору на основі аналізу мікрорухів очей. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 4 (34). С. 124–134. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.124>

Mormitko, O., Tymchyk, S. (2025), "Development of an intelligent system for early detection of vision pathologies based on analysis of eye micromovement", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (34), P. 124–134. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.124>