

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Решетняк Валентин Валентинович

УДК 004.58:004.77:159.93](043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОЦІНЮВАННЯ ДИЗАЙНУ ІНТЕРФЕЙСУ
МОБІЛЬНИХ ДОДАТКІВ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ВІДСЛІДКУВАННЯ ПОГЛЯДУ**

123 – Комп'ютерна інженерія

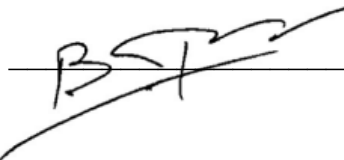
12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів

мають посилання на відповідне джерело



В.В. РЕШЕТНЯК

Науковий керівник Фауре Еміль Віталійович, доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2026

АНОТАЦІЯ

Решетняк В.В. Методи та засоби оцінювання дизайну інтерфейсу мобільних додатків на основі використання технології відслідковування погляду. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 — Комп'ютерна інженерія. — Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі підвищення ефективності оцінювання зручності користування мобільними інтерфейсами шляхом розробки методів та програмного засобу мобільного айтрекінгу на основі фронтальної камери смартфона. Стрімке зростання кількості мобільних додатків та користувачів смартфонів висуває підвищені вимоги до якості інтерфейсів та обумовлює потребу в об'єктивних інструментах оцінки їх зручності. Існуючі методи юзабіліті-тестування переважно базуються на суб'єктивних оцінках (опитувальники, інтерв'ю, експертна оцінка) та не завжди відображають реальну поведінку користувачів. Технологія відслідковування погляду (eye-tracking) дозволяє вимірювати когнітивні процеси в режимі реального часу, проте її застосування у дослідженнях мобільних інтерфейсів обмежене високою вартістю спеціалізованого обладнання, необхідністю фіксації положення пристрою та відсутністю цілісної методики оцінювання.

У першому розділі дисертації проведено аналіз сучасного стану технологій айтрекінгу. Розглянуто основні типи апаратних комплексів для відслідковування погляду: настільні трекери, мобільні окуляри, а також системи для віртуальної та доповненої реальності. Окремо проаналізовано мобільний та веб-камерний айтрекінг. Досліджено параметри, що впливають на якість відслідковування і алгоритми виявлення фіксацій: роздільність камери, частоту кадрів, точність, кучність, латентність синхронізації, час відновлення погляду та ергономічні характеристики. Проведено класифікацію та аналіз методів локалізації очей. Це охоплює підходи на основі форми, особливостей форми та зовнішнього вигляду.

Проаналізовано також методи гейз-трекінгу. Розглянуто алгоритми виявлення фіксацій: I-VT (за порогом швидкості), I-DT (за порогом розсіювання) та I-NMM (на основі прихованих моделей Маркова). Встановлено, що жодне з розглянутих рішень не поєднує мобільну платформу на базі стандартної фронтальної камери з формалізованою методикою аналізу, адаптованою до різних типів екранів. На основі виявлених обмежень сформульовано задачі дослідження.

У другому розділі розроблено два методи оцінювання дизайну мобільних інтерфейсів на основі айтрекінгу. Перший метод орієнтований на статичні екрани: визначено систему метрик візуальної уваги, запропоновано класифікацію типів екранів мобільних додатків із визначенням пріоритетних зон інтересу для кожного типу та описано шестиетапний процес проведення дослідження. Методологічну відмінність від існуючих протоколів становить те, що тип екрану і склад АОІ визначаються до початку збору даних, а суб'єктивне оцінювання зручності проводиться після кожного окремого завдання, що дає змогу безпосередньо зіставити об'єктивні метрики погляду з враженнями учасника. Другий метод орієнтований на динамічні екрани: екрани з прокручуванням, навігаційними переходами, відеоконтентом та анімованими елементами. Для таких екранів введено поняття часової зони інтересу, прив'язаної до координат повного документа і тайм-кодів; визначено метрики охоплення і залученості; алгоритм обробки даних розширено трьома операціями попередньої обробки. Цей метод описано і теоретично обґрунтовано, його емпірична валідація визначена як напрям подальших досліджень. Формалізовано правило прийняття рішення про якість дизайну, що зводить показники візуальної уваги до єдиного комплексного показника з урахуванням вагомості критеріїв, визначеної експертно для кожного типу екрана.

У третьому розділі описано проєктування та реалізацію програмного засобу EyeSense – кросплатформеного мобільного додатка на Flutter/Dart для проведення айтрекінг-досліджень на основі фронтальної камери з використанням Eyedid SDK. Реалізовано алгоритми згладжування координат погляду, виявлення фіксацій

методом I-DT, побудови теплових карт і маршрутів погляду. Передбачено п'ятиточкове калібрування та хмарне збереження анонімізованих даних, що дає змогу проводити польові дослідження без прив'язки до лабораторного середовища.

Обробка координат погляду реалізована дворівневим конвеєром: ЕМА-буфер усуває шумові коливання сирих координат і дискретизує сигнал з кроком 150 мс, тоді як модифікований алгоритм I-DT розбиває безперервний потік точок погляду на дискретні фіксації з мінімальною тривалістю 150 мс і порогом розсіювання 30 пікселів. У хмарне сховище Firebase потрапляють лише анонімізовані координати, теплові карти та демографічні метадані (UUID, вік, стать, без імені), що відповідає вимогам платформи Prolific щодо конфіденційності учасників. Функція очищення профілю між сесіями робить можливим масштабні польові дослідження на одному пристрої за будь-якого розміру вибірки.

У четвертому розділі проведено експериментальне дослідження розподілу візуальної уваги на типових екранах мобільних додатків з використанням розробленого методу та програмного засобу EyeSense. У дослідженні взяли участь 55 осіб віком від 20 до 60 років, рекрутованих через платформу Prolific, що забезпечило різноманітність вибірки за національністю, віком, статтю та цифровим досвідом. Учасники виконували завдання на трьох типових екранах: картці товару (e-commerce), екрані медичних результатів та навігаційній карті. Проведено аналіз за групами: за віком (молодші/старші 40 років) та за рівнем цифрової компетентності. Результати показали, що просторова ієрархія елементів є домінантним чинником розподілу уваги незалежно від характеристик користувача: елементи у верхній та центральній частинах екрану стабільно отримували найвищу увагу. Статистично значущих вікових відмінностей в об'єктивних метриках айтрекінгу (T_{ff} , T_{fd} , F_f) не виявлено, однак старші учасники систематично гірше оцінювали зручність інтерфейсу в суб'єктивних анкетах, що вказує на недостатність поведінкових показників для повноцінної оцінки когнітивного навантаження. Розрив між суб'єктивними оцінками молодших і старших учасників становив від 0,24 до 0,58 бали за п'ятибальною шкалою, за відсутності будь-яких

паралельних відмінностей в об'єктивних айтрекінг-метриках. Цифрова компетентність вплинула на стратегії взаємодії: досвідченіші користувачі спочатку зчитували контекстну інформацію (ціну, характеристики) і лише потім зверталися до елемента дії (СТА-кнопки), що корелювало з кращим розумінням інтерфейсу. Менш досвідчені користувачі частіше фіксувалися безпосередньо на кнопці дії, пропускаючи важливу контекстну інформацію. Виявлені закономірності розкриваються за допомогою ключових метрик. На екрані картки товару зона знижки (АОІ 1) не отримала жодної фіксації у 33% учасників; медіанний час до першої фіксації для неї склав 3666 мс проти 1672 мс для блоку ціни, розташованого вище на тому ж екрані. На медичному екрані розрив виявився більшим: показник вітаміну D (нижня зона інтересу) залишився поза увагою у 54,5% учасників із $T_{ff} = 6563$ мс, проти 3718 мс для глюкози у верхній зоні, попри однакову діагностичну значущість обох відхилень. На навігаційному екрані різниця стосувалася не стільки ієрархії уваги, скільки стратегії сканування: учасники з низькою цифровою компетентністю зверталися до курсора карти при медіанному $T_{ff} = 1206$ мс, тоді як досвідченіші приймали навігаційне рішення лише після зчитування числових даних панелі (медіана $T_{ff} = 4652$ мс). На всіх трьох екранах вертикальне розташування елемента виявилось надійнішим фактором ймовірності його фіксації, ніж функціональна пріоритетність. Поєднання об'єктивних метрик із суб'єктивними оцінками виявилось методологічно продуктивним підходом. На основі результатів сформульовано практичні дизайн-рекомендації щодо розташування критичних елементів, візуального контрасту СТА-кнопок, необхідності подвійної валідації для різних вікових груп та підвищеного виділення навігаційних елементів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному. Вперше розроблено модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження, яка за рахунок формалізації процесу взаємодії у вигляді чотирифазного циклу (сенсорна реєстрація, візуальне декодування, когнітивне інтерпретування, поведінкова реакція) з трьома паралельними

інформаційними каналами (візуальним, когнітивним і суб'єктивним) встановлює відповідність між кожною фазою та вимірюваними показниками айтрекінгу, що дозволяє локалізувати дизайн-проблему в конкретній частині взаємодії. Вперше розроблено метод оцінювання дизайну статичних мобільних інтерфейсів на основі айтрекінгу, який за рахунок використання фронтальної камери смартфона як єдиного апаратного сенсора, набору спеціалізованих метрик візуальної уваги та структурованої послідовності з шести етапів проведення айтрекінг-дослідження: (1) визначення об'єкта та цілей дослідження, (2) налаштування технічного середовища, (3) проведення експериментальної сесії, (4) збір та аналіз метрик погляду, (5) інтерпретація результатів, (6) формування рекомендацій і повторне тестування – дозволяє отримати об'єктивну оцінку дизайну інтерфейсу без використання спеціалізованого обладнання. Вперше розроблено метод оцінювання ефективності дизайну динамічних мобільних екранів, який за рахунок використання часової зони інтересу (T-AOI) з прив'язкою до координат повного документа і тайм-кодів, паралельної реєстрації стану інтерфейсу під час сесії та розширеного набору метрик охоплення і залученості (глибина, швидкість і кількість зупинок прокрутки), що реалізуються у шість послідовних етапів: (1) підготовка та розмітка T-AOI з документуванням динаміки, (2) налаштування середовища з організацією синхронізованого запису, (3) проведення сесії, (4) обробка даних із виключенням переходів та перерахунком координат у простір документа, (5) інтерпретація результатів із аналізом глибини прокрутки, (6) формування рекомендацій та верифікація змін, – що дозволяє коректно аналізувати розподіл візуальної уваги в сценаріях з динамічним контентом, де стандартна AOI, прив'язана до статичних координат екрану, не забезпечує повної картини взаємодії. Достовірність отриманих результатів забезпечена такими чинниками. По-перше вибірка з 55 учасників перевищує мінімальний поріг, обґрунтований у методологічній літературі з айтрекінгу, і має достатню статистичну потужність для виявлення міжгрупових ефектів. По-друге залучення через Prolific дало географічно та демографічно неоднорідну групу, що суттєво для методу,

розрахованого на широке практичне застосування. По-третє проведення експерименту з учасниками, які тримали власні пристрої на природній відстані перегляду, зберегло екологічну валідність; те, що дані залишилися придатними для стандартизованої постобробки, підтверджує: конвеєр стабільно працює в реальних умовах, а не лише в контрольованому середовищі.

Практичне значення результатів полягає у створенні доступного інструментарію для оцінювання мобільних інтерфейсів, що не потребує спеціалізованого обладнання. Розроблені методи та програмний засіб EyeSense можуть використовуватися UX-дослідниками, розробниками мобільних додатків і викладачами дисциплін з проєктування інтерфейсів.

Ключові слова: айтрекінг, відслідковування погляду, мобільні інтерфейси, юзабіліті, оцінювання дизайну, візуальна увага, людино-машинна взаємодія, комп'ютерний зір, нейронна мережа, глибоке навчання, аналіз зображень, машинне навчання, обробка сигналів, кластеризація, математична модель.

SUMMARY

Reshetniak V.V. Methods and tools for evaluating mobile application interface design based on eye-tracking technology. – Qualifying scientific work (manuscript).

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 123 – Computer Engineering. – Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2026.

The dissertation addresses the problem of improving the efficiency of mobile interface usability evaluation by developing methods and a software tool for mobile eye-tracking using the smartphone's front-facing camera. The rapid growth of mobile applications and smartphone users is placing increasing demands on UI quality and highlighting the need for objective usability assessment tools. Existing usability testing methods rely predominantly on subjective judgments – questionnaires, interviews, expert evaluation – and do not consistently capture actual user behavior. Eye-tracking technology records mental activities in real time, yet its application in mobile interface research remains limited by the high cost of specialized hardware, the need to fix the device's position, and the lack of an extensive evaluation methodology.

The first chapter analyses the current state of eye-tracking technologies. The main hardware categories are reviewed: desktop trackers, mobile glasses, and systems for virtual and augmented reality environments. Mobile and webcam-based eye-tracking are examined separately. Parameters affecting tracking quality are investigated, including camera resolution, frame rate, accuracy, precision, synchronization latency, gaze recovery time, and ergonomic characteristics, as well as algorithms for fixation detection. Eye localization methods are classified, covering shape-based, feature-based, and appearance-based approaches, as well as gaze-tracking techniques. Fixation detection algorithms are reviewed: I-VT (velocity threshold), I-DT (dispersion threshold), and I-HMM (hidden Markov model). The analysis shows that none of the reviewed solutions combines a mobile platform built on a standard front-facing camera with a formalized evaluation methodology adapted to different screen types. Research objectives are formulated based on the identified limitations.

The second chapter presents two eye-tracking-based methods for evaluating mobile interface design. The first method targets static screens: a visual attention metric system is defined, a classification of mobile application screen types with prioritized areas of interest for each type is proposed, and a six-stage research process is described. The key methodological distinction from present protocols is that the screen type and AOI composition are fixed before data collection begins, and subjective usability ratings are collected after each task – thereby supporting direct comparison of objective gaze metrics with participant experience. The second method targets dynamic screens: screens with scrolling, navigational transitions, video content, and animated elements. For such screens, the concept of Temporal Area of Interest (T-AOI) anchored to full-document coordinates and timecodes is introduced; coverage and engagement metrics are defined (scroll depth, scroll velocity, scroll stops); and the data processing pipeline is extended with three mandatory pre-processing operations. This method is presented as a conceptual framework, and its experimental assessment is identified as a direction for further research. A decision rule for design quality assessment is formalized, aggregating visual-attention metrics into a single composite index with criteria weights determined by experts for each screen type.

The third chapter describes the design and implementation of EyeSense – a cross-platform mobile application built on Flutter/Dart for conducting eye-tracking research using the front-facing camera with the Eyedid SDK. Algorithms for gaze coordinate smoothing, fixation detection via I-DT, and heatmap and scan-path generation are implemented. Five-point calibration and cloud storage of anonymized data are provided, enabling field research outside laboratory settings.

Gaze signal processing is realized through a two-level pipeline in which raw coordinate noise is removed and sampled at 150 ms intervals in an EMA buffer (effective 6-7 Hz), while a modified I-DT algorithm has divided the continuous CP stream into discrete fixations with a minimum duration of 150 ms and at a threshold of 30 pixels. Firebase Cloud Storage only has anonymized coordinates, heatmaps, as well as

demographical metadata (UUID, age, gender without names), and is complying with the requirements of Prolific's platform privacy.

The fourth chapter reports an experimental study of the distribution of visual attention across representative mobile application screens, using the developed method and the EyeSense software tool. The study involved 55 participants aged 20 to 60, recruited via the Prolific platform, ensuring a diverse sample across nationalities, ages, genders, and levels of digital experience. Participants completed tasks on three screen types: a product card (e-commerce), a medical results screen, and a navigation map. Group-level analysis was performed by age (below/above 40) and digital competence level. Results showed that the spatial hierarchy of elements is the dominant factor in attention distribution, regardless of user characteristics: elements in the upper and central screen areas consistently attracted the most attention. No statistically significant age-related differences were found in objective eye-tracking metrics (T_{ff} , T_{fd} , F_f); however, older participants systematically gave lower usability ratings in subjective questionnaires, indicating that behavioral measures alone are insufficient for assessing mental workload. The gap between the subjective ratings of younger and older participants ranged from 0.24 to 0.58 points on a five-point scale, with no parallel differences in objective eye-tracking metrics. Digital competence level shaped interaction strategies: more experienced users scanned contextual information (price, specifications) before engaging with the call-to-action element, which correlated with better interface comprehension, while less experienced users fixated on the action button directly, bypassing appropriate context. The session-clearing function allows for large-scale field research in one device with high participant pool sizes. Key figures for the quantitative profile of the patterns found are: Discount zone (AOI 1) was not fixated on 33% of patients on the product card screen; median T_{ff} was 3666 ms in the discount zone, versus 1672 ms for the price block. On the screen for medical results, the vitamin D indicator (lower AOI) failed to achieve fixation in 54.5% of participants at a T_{ff} of 6563 ms, versus 3718 ms for glucose, in the upper zone, with both deviations having equal diagnostic significance. Participants with low digital competence on navigation screen presented directing attention on map cursor

at a median T_{ff} of 1206 ms compared to more experienced users that made navigational decisions only after reading numeric data panel (median $T_{ff} = 4652$ ms), which implies that vertical screen position is a more accurate predictor of fixation probability than functional priority. The combination of objective metrics and subjective ratings proved methodologically productive. Practical design recommendations are formulated for the placement of critical elements, the visual contrast of CTA buttons, dual validation throughout age groups, and enhanced highlighting of navigational elements. Three aspects help establish the credibility of the results. First, the total of 55 respondents is higher than the minimum number for eye-tracking experiments and gives substantial statistical power to report between-group differences. Second, recruitment methods based on Prolific allowed the distribution of the data across countries of residence, gender and digital literacy levels, which improves the external validity of the results. Third, the combination of a naturalistic collection format with centralized cloud storage facilitated standardized post-processing of raw gaze data, avoiding the need for laboratory infrastructure.

Scientific novelty. For the first time, a model of user-interface information interaction under eye-tracking conditions is proposed, describing the interaction as a four-phase cycle with three information channels and formalizing the correspondence within interaction phases and gaze metrics. For the first time, a method for evaluating static mobile screen design using eye-tracking is developed, combining a specialized visual attention metric system, a screen-type classification, and a six-stage research process, validated with a sample of 55 participants. For the first time, a method for evaluating the design effectiveness of dynamic mobile screens is developed, introducing the concept of Temporal AOI (T-AOI) and synchronized interface-state recording for scrolling, navigational transition, and video content scenarios.

Practical significance. The results deliver an accessible toolkit for mobile interface evaluation that requires no specialized hardware. The developed methods and the EyeSense software tool can be applied by UX researchers, mobile application developers, and educators in interface design disciplines.

Keywords: eye-tracking, gaze tracking, mobile interfaces, usability, design evaluation, visual attention, human-computer interaction, computer vision, neural network, deep learning, image analysis, machine learning, signal processing, clustering, mathematical model.

Список публікацій здобувача

- [1] Reshetniak V., Faure E. Eye-tracking as a tool for researching user behavior. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2024. № 55. С. 181–190. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-23>.
- [2] Reshetniak V., Faure E. Eye-Tracking in mobile applications: design optimization and user behavior analysis. *Sensors, devices and systems* / ред.: С. Bazilo та ін. Cham, 2026. С. 374–383. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-032-18415-3_38. (Scopus).
- [3] Решетняк В., Фауре Е. Мобільний айттрекінг як інструмент виявлення відмінностей у розподілі візуальної уваги: роль віку та цифрової компетентності. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2026. Т. 1. С. 419–429. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-51>.
- [4] Решетняк В. Сучасні технології та пристрої відслідковування погляду. *Збірник тез доповідей Міжнар. наук.-практич. конфер. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій»*. Черкаси, 2022. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4353>.
- [5] Решетняк В., Фауре Е. Візуалізація результатів досліджень з відслідковування погляду. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційна безпека та комп’ютерні технології” до 30-ти річчя кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення: тези доповідей*. Кропивницький, 2023. URL: <https://kntu.kr.ua/file/content/7710/zbirnyk-tez-kb2023.pdf>.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
SUMMARY.....	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	18
ВСТУП.....	20
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ АЙТРЕКІНГУ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	30
1.1. Вступ.....	30
1.2. Існуючі апаратні комплекси для відслідковування погляду	32
1.2.1. Комплекси на основі взаємодії з екраном	33
1.2.2. Мобільні комплекси з використанням окулярів.....	34
1.2.3. Комплекси для віртуальної та доповненої реальності	35
1.2.4. Мобільний айтрекінг та веб-камерний айтрекінг	36
1.3. Параметри, що впливають на якість відслідковування	39
1.4. Методи відслідковування погляду	41
1.4.1. Методи локалізації очей.....	42
1.4.2. Методи гейз-трекінгу	43
1.4.3. Алгоритми виявлення фіксацій	46
1.5. Аналіз існуючих досліджень мобільного айтрекінгу для оцінювання інтерфейсів	49
1.6. Цілі та задачі дисертаційного дослідження	51
1.7. Висновки.....	52
2. МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ДИЗАЙНУ МОБІЛЬНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ АЙТРЕКІНГУ	53
2.1. Вступ.....	53

2.2.	Система метрик візуальної уваги	54
2.3.	Класифікація типів екранів та визначення областей інтересу	55
2.4.	Класифікація динамічних екранів мобільних інтерфейсів та їх зони інтересу	60
2.4.1.	Типологія динамічних екранів	61
2.4.2.	Додаткові метрики для динамічних екранів	62
2.5.	Модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження	65
2.5.1.	Структура моделі	65
2.5.2.	Інформаційні потоки та канали передачі	68
2.6.	Метод оцінювання ефективності дизайну статичних мобільних інтерфейсів	68
2.7.	Метод оцінювання ефективності дизайну динамічних мобільних екранів.....	73
2.8.	Багатокритеріальне колективне оцінювання та прийняття рішення про якість дизайну	77
2.8.1.	Критерії оцінювання.....	77
2.8.2.	Визначення вагових коефіцієнтів	78
2.8.3.	Нормалізація показників	79
2.8.4.	Узагальнений показник і прийняття рішення	80
2.9.	Сегментація за групами користувачів	81
2.10.	Висновки.....	81
3.	ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ EYSENSE ДЛЯ МОБІЛЬНОГО АЙТРЕКІНГУ	84
3.1.	Вступ	84
3.2.	Аналіз вимог та обґрунтування вибору технологій	84
3.3.	Архітектура додатку	86

3.4.	Взаємодія з апаратною складовою	88
3.5.	Алгоритми обробки даних погляду	89
3.5.1.	Зважене згладжування (ЕМА-буфер)	89
3.5.2.	Дискретизація даних погляду	90
3.5.3.	Алгоритм виявлення фіксацій (I-DT)	90
3.5.4.	Побудова теплової карти (Gaussian KDE)	90
3.5.5.	Побудова маршруту погляду	91
3.6.	Процес калібрування	92
3.7.	Збереження та передача даних	92
3.8.	Висновки	94
4.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ВІЗУАЛЬНОЇ УВАГИ	95
4.1.	Вступ	95
4.2.	Методика експерименту	95
4.2.1.	Характеристика вибірки	96
4.2.2.	Матеріали та обладнання	97
4.2.3.	Процедура проведення	98
4.3.	Результати	99
4.3.1.	Загальні патерни розподілу уваги	107
4.3.2.	Вікові відмінності	107
4.3.3.	Вплив цифрової компетентності	108
4.3.4.	Кореляція об'єктивних та суб'єктивних даних	109
4.4.	Багатокритеріальне колективне оцінювання якості дизайну досліджених екранів	109
4.4.1.	Формування експертної групи та визначення вагових коефіцієнтів ..	109
4.4.2.	Розрахунок комплексного показника якості дизайну	111
4.5.	Дизайн-рекомендації	114

4.6. Обмеження дослідження.....	115
4.7. Висновки.....	115
ВИСНОВКИ	118
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	122
ДОДАТКИ	131
Додаток А. Лістинг ключових модулів EyeSense	131
А.1. Точка входу (main.dart)	131
А.2. Сервіс відслідковування погляду (GazeTrackerService).....	131
А.3. Модуль калібрування (CalibrationService / CalibrationRepository)	132
А.4. Маршрутизатор та Riverpod-провайдери	134
А.5. Алгоритм виявлення фіксацій (I-DT)	135
А.6. Побудова теплової карти (Gaussian KDE)	136
А.7. Побудова маршруту погляду (Gaze Plot).....	137
А.8. Моделі даних (GazeFixation, ExperimentResult, UserProfile)	138
А.9. Завантаження до Firebase Storage.....	139
Додаток Б. Анкети та протоколи дослідження	141
Б.1. Скринінгова форма (Prolific / Google Forms)	141
Б.2. Інструкція учасника.....	142
Б.3. Анкета після кожного експерименту	142
Додаток В. Повні таблиці результатів експерименту	144
Додаток Г. Скріншоти EyeSense	167
Додаток Д. Список публікацій здобувача за темою дисертації	172

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AOI	Area of Interest – область інтересу на екрані
CR	Consistency Ratio – відношення узгодженості
CTA	Call-to-Action – елемент заклику до дії
DQI	Design Quality Index – комплексний показник якості дизайну
EMA	Exponential Moving Average – експоненційне ковзне середнє
F_f	Fixation Frequency – частота фіксацій
I-DT	Identification by Dispersion Threshold – виявлення фіксацій за порогом розсіювання
I-VT	Identification by Velocity Threshold – виявлення фіксацій за порогом швидкості
I-HMM	Identification by Hidden Markov Model – виявлення фіксацій на основі прихованих моделей Маркова
KDE	Kernel Density Estimation – ядерне оцінювання густини
PoR	Point of Regard – точка погляду
SD	Scroll Depth – глибина прокрутки

SDK	Software Development Kit – набір інструментів розробки
SS	Scroll Stops – кількість зупинок прокрутки
SV	Scroll Velocity – швидкість прокрутки
SL	Software Latency – цифрова компетентність
T-AOI	Temporal Area of Interest – часова зона інтересу
T_{fd}	Fixation Duration – тривалість фіксації
T_{ff}	Time to First Fixation – час до першої фіксації
TS	Time Spent on Screen – час, проведений на екрані
UI	User Interface – інтерфейс користувача
UX	User Experience – досвід користувача
VR/AR	Virtual Reality / Augmented Reality – віртуальна / доповнена реальність

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. За останні роки відбувається розвиток мобільних технологій та активне впровадження мобільних додатків у різноманітні сфери діяльності. Так, згідно зі звітом [1], у 2025 році у світі було завантажено приблизно 149 мільярдів нових мобільних додатків. Таке стрімке зростання ринку мобільних супроводжується посиленням конкуренції, в якій якість інтерфейсу стає визначальним чинником, що впливає на зручність використання, задоволеність користувачів, результативність виконання цільових дій, конверсію та комерційний успіх продукту. За даними дослідження [2], користувачі, незадоволені якістю інтерфейсу або продуктивністю мобільного додатка, схильні припиняти його використання, що призводить до зниження рівня утримання та потенційного переходу до конкурентних продуктів.

Традиційні методи оцінювання дизайну інтерфейсів, такі як опитування, інтерв'ю, спостереження, експертна оцінка, мають переважно суб'єктивний характер і є принципово недостатніми, оскільки вони фіксують сприйняття після взаємодії, а не сам процес такої взаємодії. Також суб'єктивні дані можуть спотворюватися через те, що учасники можуть коригувати поведінку відповідно до очікуваної відповіді. Технологія відслідковування погляду (eye-tracking) усуває це обмеження, реєструючи мимовільні рухи очей в режимі реального часу без залежності від суб'єктивних вподобань учасника.

Аналіз літератури дозволяє виокремити наступні напрямки застосування технології. Найбільш розвиненим є медико-діагностичний напрямок, де реєстрація рухів очей слугує інструментом раннього виявлення та моніторингу нейродегенеративних і психічних розладів, зокрема шизофренії, депресії, тривожності, хвороб Паркінсона та Альцгеймера [3], розладах аутистичного спектру [4], розладах дефіциту уваги [5], наслідків черепно-мозкових травм [7, 8], порушеної постави [6]. Окрему нішу в межах цього напрямку займає моніторинг когнітивного навантаження клінічного персоналу під час виконання професійних обов'язків [9].

Другий великий масив досліджень пов'язаний з оцінюванням дизайну у галузі людино-комп'ютерної взаємодії. Роботи [10], [11] та [12] фіксують зростання інтересу до айтрекінгу саме в контексті дизайн-досліджень: аналізу веб-сторінок, мобільних додатків та ігрових середовищ. Зокрема, у [13] досліджується користувацький інтерфейс систем управління навчанням (Learning Management System, LMS) за допомогою айтрекінгу для підвищення зручності їх використання. Крім того, айтрекінг дозволяє виявляти поведінкові патерни різних груп користувачів та адаптувати інтерфейс під потреби кожної з них [14]. Систематичний огляд [15] показує, що вік є одним із ключових факторів, що впливає на взаємодію з веб-інтерфейсами: він пов'язаний зі збільшенням часу виконання завдань, вищою кількістю помилок та нижчим рівнем задоволеності інтерфейсами. Зі свого боку, дослідження [16] демонструє, що користувачі з різним рівнем цифрової компетентності використовують відмінні стратегії пошуку інформації та по-іншому розподіляють візуальну увагу на екрані як у веб-системах, так і в мобільних інтерфейсах. Завдяки технології айтрекінгу можна отримати об'єктивні дані про розподіл візуальної уваги, точно виявляти вузькі місця дизайну та будувати персоналізовані рекомендації для конкретних аудиторій.

Третій тематичний блок об'єднує прикладні сфери, де технологія виходить за межі традиційного аналізу екранних інтерфейсів. Маркетингові дослідження активно залучають айтрекінг для вивчення споживчої уваги [17]. В архітектурі відслідковування погляду допомагає оцінювати сприйняття забудованого простору [18]. Суміжні технології імерсивної взаємодії, такі як віртуальна [19] та доповнена [20, 21] реальність, також інтегрують дані про рухи очей для підвищення якості користувацького досвіду.

Нарешті, четвертий блок охоплює спеціалізовані контексти використання. В [22] запропоновано використовувати айтрекінг для розмежування доступу. У військовій справі технологію застосовують для аналізу втоми солдатів [23], а в автомобільній галузі – для відстеження зосередженості водія та його зони огляду [24]. Останні дослідження розширюють сферу застосування айтрекінгу за межі

вивчення поведінки людини: зокрема, технологію використовують і для аналізу поведінки тварин під час їх дресирування [25].

Попри очевидне розмаїття застосувань, використання технології айтрекінгу для дослідження мобільних інтерфейсів залишається обмеженим через декілька факторів: висока вартість спеціалізованого обладнання, необхідність фіксації положення пристрою, складність калібрування та обмежена мобільність учасників дослідження.

Таким чином, актуальність дисертаційного дослідження обумовлена необхідністю розробки методів та програмного засобу для об'єктивного оцінювання юзабіліті мобільних інтерфейсів на основі айтрекінгу з використанням вбудованих камер смартфонів, що дозволить підвищити ефективність процесу проектування та вдосконалення мобільних додатків без потреби у дорогому спеціалізованому обладнанні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалося в рамках науково-дослідної роботи кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету. Тематика дисертації відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки України «Інформаційні та комунікаційні технології».

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні ефективності оцінювання зручності користування мобільними інтерфейсами за рахунок переходу від суб'єктивних експертних оцінок до об'єктивних кількісних показників візуальної уваги, отримуваних без використання спеціалізованого обладнання, шляхом розробки методів, алгоритмічного забезпечення та програмного засобу мобільного айтрекінгу на основі технологій комп'ютерного зору, що реалізують принципи людино-машинної взаємодії без використання спеціалізованого обладнання.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання:

- провести аналіз існуючих апаратних комплексів, програмних засобів та методів айтрекінгу, визначити їх обмеження при застосуванні для дослідження мобільних інтерфейсів та сформулювати вимоги до методу оцінювання;
- розробити модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження, яка формалізує відповідність між фазами взаємодії та вимірюваними показниками погляду;
- розробити метод оцінювання дизайну мобільних інтерфейсів на основі айтрекінгу для статичних екранів, що використовує набір метрик візуальної уваги, класифікацію типів екранів та покроковий процес проведення дослідження;
- розробити метод оцінювання дизайну мобільних інтерфейсів на основі айтрекінгу для динамічних екранів, що використовує розширений набір метрик охоплення та залученості;
- розробити програмний засіб для проведення мобільних айтрекінг-досліджень на основі фронтальної камери смартфона, що реалізує запропонований метод та забезпечує збір, обробку та візуалізацію даних про рух погляду;
- провести експериментальну валідацію розробленого методу та програмного засобу шляхом дослідження розподілу візуальної уваги на типових екранах мобільних додатків з урахуванням вікових та когнітивних характеристик користувачів.

Об'єктом дослідження є процеси взаємодії користувачів з інтерфейсами мобільних додатків.

Предметом дослідження є методи та програмні засоби оцінювання юзабіліті мобільних інтерфейсів з використанням технології айтрекінгу на основі фронтальних камер смартфонів.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач використано: методи комп'ютерного зору та обробки зображень (для локалізації очей та визначення напрямку погляду), методи статистичного аналізу та теорії ймовірностей (для обробки експериментальних даних), методи кластерного аналізу (для виявлення фіксацій з послідовності точок погляду), метод аналізу ієрархій (для визначення

вагомості критеріїв та обчислення комплексного показника якості дизайну DQI), методи дизайн-досліджень (для проведення юзабіліті-тестування), методи об'єктно-орієнтованого програмування (для розробки програмного засобу).

Наукова новизна отриманих результатів:

– ***вперше розроблено*** модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження, яка за рахунок формалізації процесу взаємодії у вигляді чотирифазного циклу (сенсорна реєстрація, візуальне декодування, когнітивне інтерпретування, поведінкова реакція) з трьома паралельними інформаційними каналами (візуальним, когнітивним і суб'єктивним) встановлює відповідність між кожною фазою та вимірюваними показниками айтрекінгу, що дозволяє локалізувати дизайн-проблему в конкретній частині взаємодії;

– ***вперше розроблено*** метод оцінювання дизайну статичних мобільних інтерфейсів на основі айтрекінгу, який за рахунок використання фронтальної камери смартфона як єдиного апаратного сенсора, набору спеціалізованих метрик візуальної уваги та структурованої послідовності з шести етапів проведення айтрекінг-дослідження: (1) визначення об'єкта та цілей дослідження, (2) налаштування технічного середовища, (3) проведення експериментальної сесії, (4) збір та аналіз метрик погляду, (5) інтерпретація результатів, (6) формування рекомендацій і повторне тестування – дозволяє отримати об'єктивну оцінку дизайну інтерфейсу без використання спеціалізованого обладнання;

– ***вперше розроблено*** метод оцінювання ефективності дизайну динамічних мобільних екранів, який за рахунок використання часової зони інтересу (T-AOI) з прив'язкою до координат повного документа і тайм-кодів, паралельної реєстрації стану інтерфейсу під час сесії та розширеного набору метрик охоплення і залученості (глибина, швидкість і кількість зупинок прокрутки), що реалізуються у шість послідовних етапів: (1) підготовка та розмітка T-AOI з документуванням динаміки, (2) налаштування середовища з організацією синхронізованого запису, (3) проведення сесії, (4) обробка даних із виключенням переходів та перерахунком

координат у простір документа, (5) інтерпретація результатів із аналізом глибини прокрутки, (6) формування рекомендацій та верифікація змін, – дозволяє коректно аналізувати розподіл візуальної уваги в сценаріях з динамічним контентом, де стандартна AOI, прив’язана до статичних координат екрану, не забезпечує повної картини взаємодії.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні доступного інструментарію для оцінювання якості мобільних інтерфейсів. Наявні рішення для айтрекінг-досліджень мобільних додатків потребують або дорогого стаціонарного обладнання, або не мають формалізованої процедури аналізу. Результати дисертаційної роботи закривають цей розрив: розроблені методи оцінювання, їх алгоритмічне забезпечення та програмний засіб EyeSense у сукупності утворюють замкнений інструментарій, що покриває усі етапи айтрекінг-дослідження: від постановки дослідницького питання до верифікованих дизайн-рекомендацій.

Алгоритм реалізації методу оцінювання статичних екранів охоплює шість етапів: класифікація екрану та визначення AOI до початку збору даних, формування вибірки, налаштування та калібрування програмного засобу, проведення сесії з поєкранним суб’єктивним оцінюванням після кожного стимулу, обробка та аналіз метрик погляду, формулювання рекомендацій і повторне тестування після внесення дизайнерських змін.

Алгоритм реалізації методу оцінювання динамічних екранів розширює базову процедуру трьома обов’язковими операціями попередньої обробки: синхронізацією тайм-кодів потоку погляду зі станом інтерфейсу, трансформацією екранних координат у координати повного документа та паралельною реєстрацією подій прокрутки і навігаційних переходів.

Обробка сигналу погляду реалізована у вигляді дворівневого конвеєра. На першому рівні ЕМА-буфер згладжує шумові коливання сирих координат камери: дискретизація з кроком 150 мс дає ефективну частоту 6-7 Гц, достатню для надійної локалізації погляду у межах AOI. На другому рівні адаптований I-DT розбиває

безперервний потік координат на дискретні фіксації, придатні для кількісного порівняння між учасниками. Для просторової діагностики розподілу уваги будуються теплова карта та маршрут погляду. Усі процедури реалізовані у програмному засобі EyeSense і можуть бути відтворені або адаптовані незалежно від нього.

Розроблений мобільний додаток EyeSense забезпечує засобами стандартного смартфона з фронтальною камерою повний цикл айтрекінг-дослідження: калібрування, запис координат погляду, побудову теплових карт і маршрутів, хмарне завантаження анонімізованих результатів. Кросплатформна реалізація (iOS та Android) усуває залежність від конкретної моделі пристрою учасника. Завдяки функції очистки профілю і результатами між сесіям, стають можливими польові дослідження з великою кількістю учасників на одному пристрої. Питання конфіденційності вирішено на рівні архітектури: відеопотік не зберігається, у хмару передаються лише координати, теплові карти та анонімізовані демографічні дані (UUID, вік, стать без імені). Такий формат є узгодженим з вимогами платформи Prolific, через яку і здійснювався набір учасників у рамках даного дослідження.

Для перевірки придатності інструментарію в реальних умовах проведено експериментальне дослідження на трьох типових екранах мобільних додатків: картці товару, екрані медичних результатів та навігаційній карті з кнопкою пошуку паркування. До кожного екрану заздалегідь визначено дві АОІ; після взаємодії з кожним стимулом учасник оцінював легкість виконання завдання за шкалою від 1 («дуже легко») до 5 («дуже важко»). Сесія включала 5-точкове калібрування і виконання завдань у природному режимі: учасник тримав смартфон на відстані 30-40 см, як при звичайному користуванні. До дослідження залучено 55 осіб віком 20-60 років (середній вік 37,2 року), залучених через платформу Prolific. Міжнародна вибірка забезпечила різноманітність за національністю та цифровим досвідом, що підвищує точність висновків.

Дані трьох експериментів дають кількісну характеристику проблем, які метод здатен виявляти. На екрані картки товару зона знижки (AOI 1) не привернула увагу у 33% учасників за весь час виконання завдання; медіанний час до першої фіксації (T_{ff}) для неї склав 3666 мс проти 1672 мс для блоку ціни. На медичному екрані показник вітаміну D (AOI 2, нижня зона) залишився поза увагою 54,5% учасників; його T_{ff} – 6563 мс проти 3718 мс для глюкози у верхній зоні, попри однакову діагностичну значущість обох відхилень. На навігаційному екрані зафіксовано якісно відмінні стратегії сканування: учасники з низькою цифровою компетентністю зверталися до курсора мапи через 1206 мс, а досвідченіші лише після зчитування числових даних інформаційної панелі, і медіана T_{ff} для курсора у цій групі становила 4652 мс. Учасники, що спочатку опрацьовували контекст, проводили у зоні курсора вдвічі довше (714 мс проти 336 мс) і краще орієнтувалися в інтерфейсі.

Між об'єктивними метриками погляду та суб'єктивними оцінками зручності виявлено систематичну розбіжність, яку традиційні методи тестування не фіксують. Статистично значущих відмінностей між молодшою та старшою групами в айтрекінг-даних не виявлено, проте у суб'єктивних анкетах старші учасники стабільно давали гірші оцінки в усіх трьох завданнях: розрив становив від 0,24 до 0,58 балів. Такий результат неможливо отримати ані за допомогою чисто поведінкових метрик, ані за допомогою єдиного підсумкового опитування після сесії. Саме поєднання прив'язка суб'єктивних оцінок до відповідних метрик погляду і є тим механізмом, що робить розбіжність видимою. На основі цих даних сформульовано конкретні дизайн-рекомендації: критична інформація повинна бути у верхній третині видимої зони екрану; показники відхилень необхідно розміщувати з колірним маркуванням незалежно від їхнього вертикального положення; навігаційні елементи мають мати підвищений контраст форми.

Розроблений інструментарій адресований двом категоріям користувачів. Для команд розробників мобільних додатків він є доступною альтернативою лабораторному айтрекінгу на етапах ітераційного тестування. Для академічного

середовища може застосовуватись в межах дисциплін з дизайну інтерфейсів, дизайн-досліджень та аналізу взаємодії людини й комп'ютера. Додаток EyeSense надає студентам змогу самостійно пройти повний цикл дослідження: від збору даних погляду до інтерпретації метрик і формулювання рекомендацій без лабораторної інфраструктури.

Отримані результати забезпечують обґрунтовану основу для прийняття проєктних рішень на всіх етапах розробки мобільних додатків. Метрики візуальної уваги, дають змогу кількісно порівнювати альтернативні варіанти розміщення елементів інтерфейсу та обирати той, що забезпечує оптимальний розподіл уваги відповідно до проєктних пріоритетів. Виявлені зони з відсутністю фіксацій указують на конкретні компоненти інтерфейсу, що потребують першочергового доопрацювання, усуваючи необхідність суб'єктивних дизайнерських рішень. Комплексний показник DQI зіставляється з пороговими рівнями якості, що безпосередньо визначають характер подальших дій: прийняття екрана, доопрацювання окремих зон інтересу або повторне проєктування. Це робить запропонований підхід застосовним у командах продуктової розробки, де рішення щодо якості інтерфейсу приймаються у стислі терміни та мають бути обґрунтовані кількісно.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві з науковим керівником Фауре Е.В., здобувачу належать: розробка методу оцінювання мобільних інтерфейсів, проєктування та реалізація програмного засобу EyeSense, проведення експерименту, обробка та інтерпретація результатів. Науковому керівнику належать: постановка задач, методологічне консультування, загальна координація дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на:

- Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (м. Черкаси, 9 грудня 2022 р.);

- VII Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційна безпека та комп’ютерні технології”. (м. Кропивницький, 1 листопада 2023 р.);
- 12th International Scientific & Technical Conference "Sensors, Devices and Systems – 2025" (м. Черкаси, 18–19 вересня 2025 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані в 5 наукових працях, у тому числі: 3 наукових статтях, з яких 1 входить до бази даних Scopus, 2 – у вітчизняних фахових наукових журналах, а також 2 матеріалах і тезах доповідей на конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний об’єм дисертації складає 172 сторінки. Робота містить 18 таблиць і 19 рисунків.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ АЙТРЕКІНГУ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Вступ

Технологія відслідковування погляду (eye-tracking) дає можливість вивчати поведінку користувача під час взаємодії з комп'ютерними системами. Відповідно до [26], інформація поглинається під час моментів фіксації очей, які відбуваються між швидкими рухами очей (сакадами). Таким чином, тривалість часу фіксації на конкретному стимулі може бути індикатором ефективності процесу зчитування інформації. Для вивчення цієї ефективності використовуються розглянуті у цьому розділі апаратно-програмні комплекси (айтрекери), що збирають часову та просторову інформацію про переміщення та фіксацію погляду.

Даний розділ присвячений аналізу існуючих апаратних комплексів для відслідковування погляду, огляду методів обробки даних та визначенню перспективних напрямків досліджень, що дозволить обґрунтувати необхідність розробки нового методу оцінювання мобільних інтерфейсів.

Методологічна база дослідження сформована на основі декількох груп джерел, кожна з яких визначила конкретні рішення щодо експерименту, вибору метрик та інтерпретації результатів.

Перша група досліджень складалася з практичних посібників з планування та проведення айттрекінг-експериментів. Зокрема, у роботі [27] представлено комплексний практичний посібник з мобільного айттрекінгу у психологічних дослідженнях, який став відправною точкою для планування протоколу айттрекінг-експерименту. Опублікована серія з п'яти статей "The Fundamentals of Eye Tracking" [28, 29, 30] представила цілісну методологічну основу для планування, проведення та інтерпретації айттрекінг-експериментів. В серії охоплюються зв'язок між теорією та дослідницькими питаннями, принципи визначення метрик руху очей, підходи до вибору обладнання, інструменти для проведення досліджень, а також роль пілотних експериментів у забезпеченні якості даних. [31, 32] На неї спирається запропонована в розділі 2 система метрик візуальної уваги.

В другій групі досліджень розглядаються питання удосконалення калібрування для систем, що використовують вбудовані камери. Зокрема, у роботі [33] описується розроблений open-source Python фреймворк GazeFollower, адаптований для айтрекінгу із фронтальних камер смартфонів. Система демонструє точність, достатню для польових досліджень, забезпечуючи отримання даних про переміщення погляду у реальному часі. Це підтвердило можливість досягнення польової точності фронтальних камер без інфрачервоного освітлення. Як альтернативний метод калібрування, у [34] запропоновано метод, що використовує природне читання тексту замість явних калібрувальних завдань. Запропонований підхід демонструє вищу точність порівняно з традиційною 5-точковою калібрацією, наближеною до професійних айтрекінг-систем, без використання додаткових інфрачервоних опромінювачів, що робить його придатним для застосування у веб-камерному та мобільному айтрекінгу для екранів, що містять багато текстів.

Наступною групою є така, що охоплює дослідження, які присвячені безпосередньо методології проведення айтрекінг-експериментів. Так, у роботі [35] наведено емпіричні докази того, що для стабільної оцінки перегляду сцен за допомогою айтрекінгу достатньо вибірки розміром 30-40 учасників, що надалі вплинуло на кількість учасників експерименту. Дослідження [36] звертає увагу на труднощі, з якими стикаються літні користувачі під час взаємодії з мобільними інтерфейсами. Завдяки айтрекінгу виявлено, що візуальне перевантаження значно ускладнює пошук функцій, тоді як можливість приховування нерелевантних елементів суттєво покращує продуктивність. У роботі [37] проаналізовано вікові фізіологічні зміни, що впливають на якість айтрекінг-даних, зокрема зменшення розміру зіниці, підвищену частоту моргань і зниження стабільності фіксацій, що вимагає адаптації калібрування, вибору метрик і дизайну експерименту. Крім того, у дослідженні [38] виявлено відмінності в патернах переміщення погляду між групами користувачів з різним рівнем цифрової компетентності.

Прикладна робота з оцінки зручності та користувацького досвіду мобільного додатка для підтримки терапії пацієнтів із онкологічними захворюваннями [39] підтвердила доцільність комбінування айтрекінг-метрик із суб'єктивними оцінками користувачів.

1.2. Існуючі апаратні комплекси для відслідковування погляду

Вивчення руху очей почалось ще з середини ХХ століття, проте, як можна побачити на графіку згадування терміну «eye-tracking» в друкованих джерелах (Рисунок 1.1), найбільшого розвитку технологія відслідковування погляду набула після 1990 року, коли відбулось розповсюдження персональних комп'ютерів і виникла потреба вивчати взаємодію користувачів систем людина-комп'ютер в різних умовах і для різних задач. Як можна побачити, технологія відслідковування погляду швидко розвивається останніми роками, що пов'язано зі збільшенням використання комп'ютерних систем, до яких можна віднести смартфони та планшети, а також з розширенням сфер застосування цієї технології.

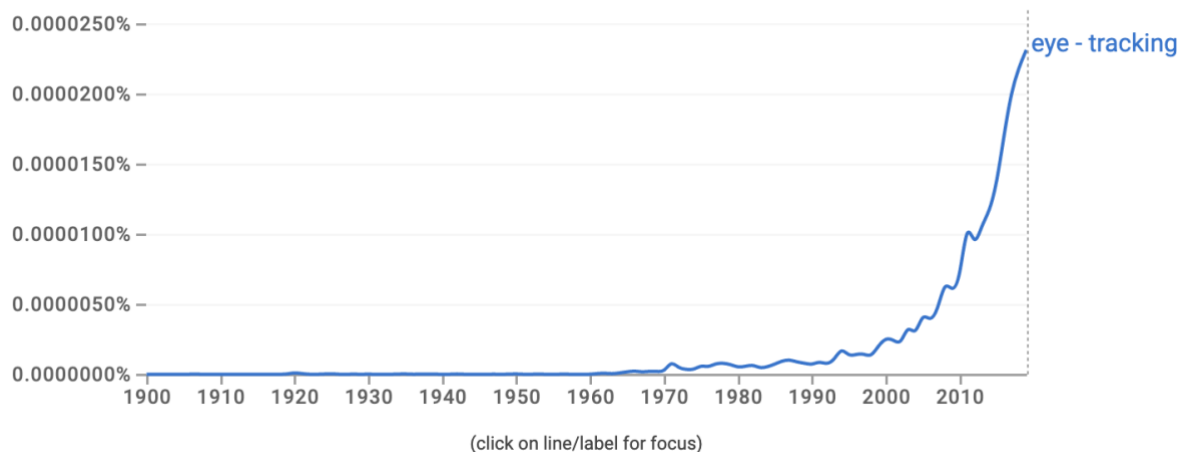


Рисунок 1.1 – Згадування терміну «eye-tracking» в друкованих виданнях з 1900 року по 2019 рік. Дані Google Books Ngram Viewer [40]

Для вивчення руху очей застосовуються програмно-апаратні комплекси, що класифікуються за різними параметрами, такими як мобільність, тип використовуваного обладнання, сфери використання та іншими. У цьому розділі

будуть розглянуті такі основні види програмно-апаратних комплексів та проаналізовані їх особливості, переваги та недоліки:

- Комплекси на основі взаємодії з екраном;
- Мобільні комплекси з використанням окулярів;
- Комплекси, що використовують пристрої для віртуальної реальності.

Окремо треба відзначити, що відслідковування погляду може бути виконано без допомоги сторонніх пристроїв, за допомогою вбудованих камер (або зовнішніх веб-камер) комп'ютерів та смартфонів. В цьому випадку використовується айтрекінг на основі видимого світла, без застосування інфрачервоного світла, яке використовується в зовнішніх приладах.

1.2.1. Комплекси на основі взаємодії з екраном

Комплекси, що використовуються разом зі стаціонарним екраном комп'ютера, називаються Desktop Eye Trackers. Такі пристрої є найбільш розповсюдженими оскільки мають найбільшу історію розвитку. Вони складаються з випромінювача (або декількох) інфрачервоного світла та однієї або декількох цифрових камер, які знімають зображення в близькому до інфрачервоного спектрі, що спрямовані на очі користувача. Ці комплекси монтуються під чи над монітором, що дозволяє в реальному часі зчитувати рух погляду та передавати координати переміщення точки фокусування на екрані. Приклади таких пристроїв: Tobii Pro Spectrum, Tobii Pro Spark, TOBII PRO NANO, iMotions Gazepoint GP3 HD, iMotions Smart Eye AI-X (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Пристрої Tobii Pro Spectrum [41] та iMotions Gazepoint GP3 [42]

До пристроїв такого типу можна також віднести стаціонарні пристрої для відслідковування погляду на мобільних девайсах (смартфонах та планшетах). Такі пристрої мають такий же принцип дії, як і ті, що використовуються з екранами комп'ютерів. Прикладом такого пристрою є Tobii Pro Nano, який можна використовувати як з комп'ютером, так і з мобільними пристроями (Рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Використання пристрою Tobii Pro Nano зі смартфоном [43]

Пристрої такого типу дають точні результати відслідковування погляду, проте обмежують рухи голови користувача, потребують калібрування під час кожного використання, а також не є мобільними у їхньому переміщенні, що накладає обмеження у взаємодії зі смартфонами та планшетами.

1.2.2. Мобільні комплекси з використанням окулярів

Окуляри, обладнані сенсорами для відстеження руху очей, прийшли на заміну масивним і незручним пристроям, що кріпилися на голову, наприклад ASL Headmounted Eye Tracker. [44]. В таких окулярах використовується така ж технологія, що й в комплексах на основі взаємодії з екраном, проте ключовою особливістю є додаткова камера, що направлена по напрямку погляду. Така

особливість, поєднана з високою мобільністю таких пристроїв, дозволяє вивчати не лише взаємодію людини з екранами комп'ютерних систем, а й взаємодію з навколишнім середовищем, в реальних умовах, таких як магазини, робочі місця, громадський транспорт і таке інше, що актуально, наприклад, в рекламі. Прикладами таких пристроїв є Pupil Invisible, Tobii Pro Glasses 3 (Рисунок 1.4) та Viewpointssystem VPS 19.



Рисунок 1.4 – Структура Tobii Pro Glasses 3 [45]

Пристрої такого типу мають перевагу в мобільності, не потребують додаткового калібрування, а також не обмежують рухи голови. Такі пристрої мають більш широке практичне застосування, оскільки не потребують монітору, на який необхідно дивитись.

1.2.3. Комплекси для віртуальної та доповненої реальності

З розвитком популярності імерсивних середовищ з'явилася потреба у відслідковуванні погляду у них. Пристрої такого типу, як правило, інтегровані в самі шоломи віртуальної реальності та окуляри доповненої реальності, проте існують пристрої-доповнення, які виконані окремо і можуть підключатися до таких шоломів та окулярів. Прикладом пристрою-доповнення є Binocular Add-on від Pupil Labs для шоломів віртуальної реальності компанії HTC. В таких комплексах також використовується технологія зчитування інфрачервоного відображення світла з ока, що дозволяє вирахувати напрямок погляду.

Порівняно з іншими приладами, які використовуються переважно для досліджень поведінки користувача, прилади, що використовуються в шоломах віртуальної реальності та окулярах доповненої реальності, мають більш практичне застосування. Наприклад, в окулярах доповненої реальності Microsoft HoloLens 2 завдяки відслідковуванню погляду досягається ефект голограми – зображення на екрані окулярів змінюється відповідно до кута нахилу погляду до екрану. Ще одним застосуванням технології відслідковування погляду є фовеальний рендерінг (Foveated Rendering), що застосовується в шоломах віртуальної реальності: фовеальна система візуалізації представляє фовеальне бачення з повною роздільною здатністю та периферійне бачення з низькою роздільною здатністю. [46]

У імерсивних середовищах відслідковування погляду покращує взаємодію користувача і робить її більш природною, однак через особливості таких середовищ, виникають додаткові виклики, такі як обмеження робочого простору чи постійне зміщення положення голови користувача.

1.2.4. Мобільний айтрекінг та веб-камерний айтрекінг

Зазначені раніше комплекси потребують устаткування складним і дорогим обладнанням, що значно обмежує використання технології. Разом з тим розвиваються такі напрямки айтрекінгу, які використовують вбудовані камери ноутбуків, планшетів і смартфонів, а також побутові веб-камери. Ці напрямки значно знижують поріг входу в використання технології айтрекінгу, хоча і дещо уступають в точності порівняно з використанням професійних айтрекерів.

Мобільний айтрекінг на основі вбудованих камер є перспективним, але недостатньо дослідженим напрямком. Дослідження [47] показало, що системи на основі фронтальних камер смартфонів із застосуванням алгоритмів глибокого навчання здатні забезпечити точність, достатню для базового аналізу інтерфейсу. Система vGaze [48] запропонувала автоматичний вибір кадрів з високою візуальною помітністю для неявного калібрування, що значно підвищує точність у

динамічних умовах. Підхід [49] використовує багатокамерні конфігурації для моделювання просторових координат ока без традиційного калібрування.

Наразі представлено декілька програмних продуктів, що дозволяють відслідковувати погляд за допомогою вбудованої або зовнішньої веб-камери комп'ютера. Так, компанія GazeRecorder має декілька програмних продуктів, що базуються на веб-камерному айтрекінгу: для побудови теплових карт перегляду веб-сайтів, для керування курсором миші, для вводу тексту та для прокрутки сторінок [50]. Схожим прикладом є безкоштовна програма myEye, що дає змогу керувати курсором за допомогою погляду. Вона була розроблена з акцентом на зручність для людей з бічним аміотрофічним склерозом, що можуть взаємодіяти лише поглядом. [51] Відкрита бібліотека JavaScript WebGazer.js також використовує дані з веб-камери для визначення, куди дивиться користувач на сторінці. Цю бібліотеку можна інтегрувати у веб-додатки для аналізу поведінки користувачів. [52]. Один із лідерів ринку айтрекінгу – компанія Tobii – також має програмний продукт, що підтримує веб-камерний айтрекінг. Програмний продукт Tobii Sticky дозволяє проводити айтрекінг-дослідження реклами, відео та пакувань за допомогою стандартної веб-камери. [53] Компанія iMotions також пропонує своє програмне рішення веб-камерного айтрекінгу – iMotions Online. [54]

Порівняно з використанням професійного обладнання, веб-камерний айтрекінг має свої переваги перш за все через його доступність та простоту установки. [55, 56, 57] Цей підхід значно знижує вартість впровадження технології айтрекінгу, оскільки не потребує додаткового обладнання: більшість ноутбуків вже оснащена вбудованими камерами, а стаціонарні комп'ютери легко можна доповнити звичайною веб-камерою. Програмні рішення для веб-камерного айтрекінгу, такі як бібліотека WebGazer.js, легко інтегруються з існуючими веб-сайтами. Більше того, деякі з таких програмних продуктів можна використовувати одночасно з іншими програмами, що дозволяє проводити їхнє дослідження.

Незважаючи на переваги веб-камерного айтрекінгу, вони ж є і джерелом недоліків цього підходу. Використання стандартних вбудованих або звичайних

веб-камер може знижувати точність вимірювань, особливо в умовах недостатнього освітлення, в порівнянні зі спеціалізованим айтрекінговим обладнанням. Також присутня доволі широка варіативність в якості камер, що не дає можливості однозначно передбачити результат дослідження. Цей метод сильно залежить від відстані між камерою та користувачем: зі збільшенням цієї відстані якість відслідковування погіршується, аналогічно до змін в положенні голови користувача.

Щодо мобільного айтрекінгу, в магазинах додатків Google Play та Apple App Store можна знайти декілька тестових програм, що дозволяють відслідковувати погляд, проте не мають прикладного застосування. Але варто відзначити додатки Hawkeye [58] та SeeSo [59], які дозволяють проводити айтрекінг-дослідження веб-сайтів.

Як і у веб-камерному айтрекінгу, у мобільному айтрекінгу головною перевагою є його доступність: майже всі смартфони і планшети обладнані фронтальною камерою, яка й використовується для досліджень. Ще однією значною перевагою є мобільність: завдяки відсутності потреби у стаціонарному дослідженні можна зафіксувати природну взаємодію користувачів з мобільними інтерфейсами, що забезпечує отримання більш точних даних поведінку.

Мобільному айтрекінгу властиві ті ж недоліки, що й для веб-камерного: широка варіативність камер і нижча точність порівняно з професійним обладнанням. Проте цей підхід має і свої особисті недоліки, пов'язані з використанням його на мобільних пристроях. Так, малі розміри екранів смартфонів обмежують амплітуду переміщень погляду, що, своєю чергою, ускладнює точне відстеження погляду. При використанні мобільних пристроїв положення голови змінюється більше і частіше, ніж під час взаємодії з екраном ноутбука або монітора. При використанні мобільного пристрою може виникнути більш часте і більш різке змінення умов освітлення. Також є технічні обмеження: не всі моделі смартфонів спроможні забезпечити ефективну обробку відеосигналу в реальному часі через великі обчислювальні навантаження; активне використання камери та обробка

даних можуть швидко споживати заряд батареї мобільного пристрою. Ще однією проблемою є використання технології мобільного айтрекінгу для дослідження мобільних додатків. На відміну від веб-сайтів, для яких можна вмонтувати функцію айтрекінгу в браузер, для мобільних додатків необхідно вмонтовувати цю функцію для кожного окремого додатка.

Веб-камерний і мобільний айтрекінг активно розвивається, але існує ряд викликів, які ще потрібно розв'язати. Перш за все, є потреба в підвищенні точності відслідковування, особливо в умовах низької освітленості та при використанні камер низької якості. Цього можливо досягти завдяки подальшому вдосконаленню калібрування. Необхідно знайти способи мінімізації впливу зовнішніх факторів, таких як освітлення та зміна положення голови, які можуть спотворювати дані айтрекінгу. Також для мобільного айтрекінгу ключовим завданням є розробка точних алгоритмів, які будуть вимагати менших обчислювальних потужностей. Це дозволить забезпечити високу продуктивність навіть на пристроях з обмеженими ресурсами. Таким чином, обидва напрямки потребують подальших досліджень і розробок для подолання існуючих обмежень.

1.3. Параметри, що впливають на якість відслідковування

Більшість пристроїв використовує технологію аналізу відображення інфрачервоного випромінювання, знятого на одну або декілька камер. Через це основними параметрами, що можуть впливати на якість відслідковування, є:

- Роздільна здатність камери. Завдяки більшій роздільній здатності забезпечуються більш точні дані про переміщення погляду.
- Кількість камер. Оскільки камери розміщуються під різними кутами до ока, це дозволяє більш точно розпізнати напрямок погляду.
- Частота кадрів. Більша частота кадрів дозволяє більш плавно відслідковувати переміщення погляду та зафіксувати більш короткі зміни напрямку погляду.
- Точність. Це відхилення між реальним положенням погляду та положенням погляду, що зафіксовано [60].

– Кучність. Це міра варіації зафіксованих даних. Вона визначається як здатність пристрою надійно продовжувати вимірювання точки погляду від одного кадру до іншого. Кучність обчислюється за допомогою середньоквадратичного точок вибірки [61].

– Затримка синхронізації. Вона визначається як час між фіксацією зображення ока та моментом, коли дані доступні у програмі на основному комп'ютері. Цей час включає час експозиції зображення, час зчитування та передачі зображення, час обробки та час передачі даних на основний комп'ютер [62]. Для пристроїв, що використовуються в системах віртуальної та доповненої реальностей, низька затримка є необхідною для покращення досвіду користувача.

– Час відновлення погляду. Це час, який необхідний для відновлення відслідковування погляду після тимчасової втрати його (наприклад, коли учасник повертається спиною до пристрою для відслідковування очей). Якщо пристрій не може виявити очі на останньому місці розташування протягом кількох сотень мілісекунд, він почне шукати очі по всій зоні відслідковування [63].

– Ємність батареї. Для автономних пристроїв важливим показником є ємність батареї, що може накладати обмеження на процес відслідковування.

– Ергономічні особливості. Системи, що обмежують рух користувача, та незручні пристрої можуть призводити до дискомфорту користувача, що може впливати на точність даних.

Для мобільного айтрекінгу на основі вбудованих камер особливо важливими є: роздільність фронтальної камери (сучасні смартфони забезпечують Full HD 1920×1080 пікселів та вище), обчислювальна потужність пристрою (необхідна для обробки відеопотоку в реальному часі), умови освітлення (змінюються значно частіше, ніж при стаціонарному використанні) та положення голови користувача (менш фіксоване порівняно з настільними системами).

Дослідження та покращення наведених параметрів є важливими для розробки більш ефективних та точних систем відслідковування погляду. Не менш важливим є комплексна оцінка цих параметрів та їхнього взаємного впливу. Враховуючи

наведені фактори, можна підвищити точність відслідковування, покращити досвід взаємодії користувача з системою та підвищити комфорт користувача.

1.4. Методи відслідковування погляду

З початку виникнення технології відслідковування погляду було винайдено декілька напрямів цієї технології: електроокулографія, електромагнітна окулографія, та відеоокулографія (айтрекінг). У методах електроокулографії навколо очей закріплюються сенсори для вимірювання електричного поля, що змінюється при повороті очей, і положення ока визначається за зміною малих різниць потенціалу навколо ока [64, 65]. В електромагнітній окулографії використовують спеціальні контактні лінзи з інтегрованою котушкою індуктивності, і положення ока визначається за орієнтацією котушки в магнітному полі. Найчастіше в комерційних пристроях використовується відеоокулографія або айтрекінг, що дозволяє виявляти напрям погляду, аналізуючи відеопотік з обличчям. [66]

Сучасний айтрекінг вирішує дві задачі: локалізацію очей та співставлення переміщення погляду з відповідними об'єктами спостереження (гейз-трекінг). Серед методів локалізації очей існує 3 основні підходи:

- Методи на основі форми очей (Shape Based Methods);
- Методи на основі особливостей форми (Feature Based Shape Methods);
- Методи на основі оточення області очей (Appearance-Based Methods).

Гейз-трекінг дає можливість співставити переміщення очей з об'єктами та зонами, на які направлено погляд, і відслідкувати переміщення погляду. Залежно від устаткування методи гейз-трекінгу можуть бути охарактеризовані кількістю камер (одна або декілька), наявністю інфрачервоного освітлення (активного і пасивного) і кількістю додаткових джерел інфрачервоного освітлення (одне або декілька). Як і методи локалізації очей, методи гейз-трекінгу мають такі основні підходи:

- Методи на основі особливостей форми (Feature-Based Methods);
- Методи на основі моделей (Model-Based Methods);

- Методи на основі перехресного співвідношення (Cross Ratio based Methods);
- Методи на основі оточення області очей (Appearance-Based Methods).

Варто зазначити, що більшість методів локалізації очей і гейз-трекінгу заснована на використанні додаткового інфрачервоного освітлення разом з камерами, що здатні його сприймати. Це накладає деякі обмеження на використання таких методів. Так, наприклад, це ускладнює використання айтрекера в умовах яскравого сонячного світла. Також, оскільки сучасні смартфони в більшості не мають передньої інфрачервоної камери (або не дозволяють стороннім розробникам використовувати її), це унеможливорює використання таких методів в мобільному айтрекінгу.

1.4.1. Методи локалізації очей

Першочерговою задачею в айтрекінгу під час аналізу відеопотоку є виявлення очей у ньому. Основним плюсом є те, що зовнішній вигляд очей має багато спільних рис серед людей, незалежно від їхнього віку, статі чи етнічної приналежності. Однак існує низка викликів, які ускладнюють такий аналіз: носіння окулярів, необхідність адаптації до різних позицій голови, частота моргання, закритість очей, індивідуальні відмінності у розмірах та ступені відкритості очей та інші чинники. У сфері комп'ютерного зору задача локалізації очей часто виконується паралельно з виявленням обличчя. Для ефективного розв'язання цієї задачі можна застосовувати методи, які спочатку виявляють обличчя, що значно спрощує подальшу локалізацію очей у визначеній області.

Методи локалізації на основі форми очей (Shape-Based Methods) пропонують побудову геометричної моделі ока. Серед них існують методи, які використовують просту еліптичну модель ока, де модель ока базується на еліптичній формі контуру райдужки, а також методи, де око представлено більш складною формою, як, наприклад, двома параболою для повік і еліпсом для райдужки [68]. Важливою властивістю цих методів є їхня загальна здатність обробляти зміни форми, масштабу та повороту. [69]

В методах на основі особливостей форми (Feature-Based Shape Methods) досліджуються характеристики ока, щоб ідентифікувати набір характерних ознак навколо очей. Лімб, зіниця та відблиск рогівки є загальними ознаками, що використовуються для локалізації очей. [69]

Методи на основі оточення області очей (Appearance-Based Methods) виявляють і відстежують очі безпосередньо на основі фотометричного вигляду, який характеризується розподілом кольорів або реакцією фільтрів ока та його оточення. Однією з основних переваг виявлення є зменшення впливу зміни освітленості шляхом збереження підсмуг, менш чутливих до освітленості, і видалення підсмуг, чутливих до зміни освітленості. Методи на основі зовнішнього вигляду можуть бути засновані на шаблонах зображень, де зберігається як просторова інформація, так і інформація про інтенсивність кожного пікселя, або на холістичному підході, де розподіл інтенсивності характеризується ігноруванням просторової інформації. Методи, засновані на зовнішності, зазвичай потребують збору великої кількості навчальних даних, що представляють очі різних суб'єктів, при різній орієнтації обличчя і різних умовах освітлення, але моделі, що лежать в їх основі, по суті, не залежать від класу об'єкта. [66]

1.4.2. Методи гейз-трекінгу

Основною задачею гейз-трекінгу або прогнозування погляду є співставлення переміщення очей з точкою погляду (Point of Regard, PoR) – позицією в відображуваному контенті, яку, як передбачається, переглядає користувач. Аналізуючи рух точки погляду, можна виявити фіксації погляду і сакади – швидкі переміщення погляду – і виявити відповідно до [26] ступінь поглинання інформації.

В методах гейз-трекінгу широко застосовується освітлення близьким до інфрачервоного світла очей, що дає змогу камерам зчитувати переміщення ока. Наразі існують два методи такого освітлення: метод «світлої зіниці» і метод «темної зіниці».

Метод «світлої зіниці» (Рисунок 1.5) використовує контраст між зіницею та райдужкою, створений паралельними до оптичної осі камери інфрачервоними

променями. Він ефективно зменшує шуми, викликані віями або відблисками, та підходить для різних освітлювальних умов. Зіниця на зображенні здається яскравою через відбиття світла від сітківки. [67]

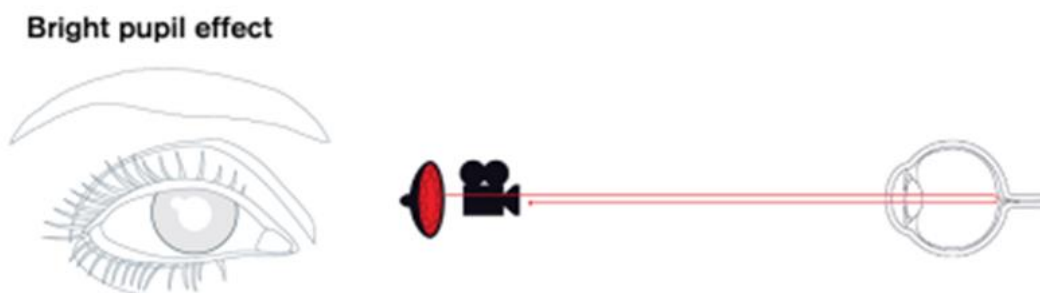


Рисунок 1.5 – Метод «світлої зіниці» [67]

Метод «темної зіниці» (Рисунок 1.6) також використовує інфрачервоне світло, але освітлення розміщується під кутом до оптичної осі камери. Це дозволяє створювати стаціонарні системи, незалежні від камери. Проте зіниця стає більш чутливою до зовнішнього світла, що обмежує використання методу у дуже освітлених умовах. [67]

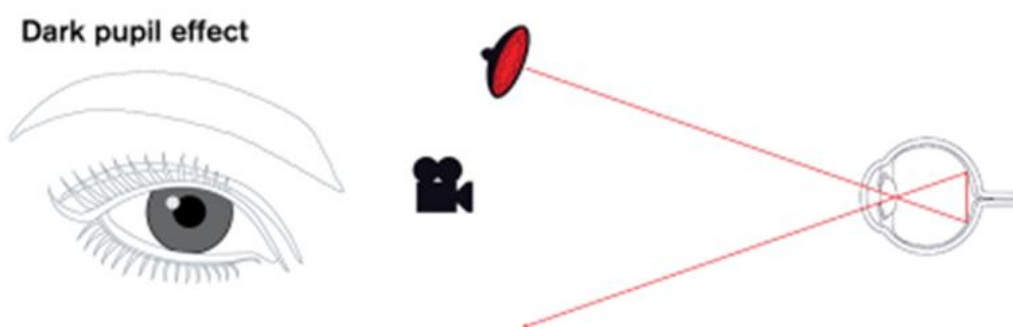


Рисунок 1.6 – Метод «темної зіниці» [67]

Загалом, визначення точки фокусування погляду відбувається шляхом порівняння позиції ближнього інфрачервоного світла (відбитого оком) з позицією зіниці. Комбінуючи цю інформацію з даними про розташування голови, можна визначити точку фокусування погляду.

Використання методів гейзтрекінгу, що базуються на видимому спектрі світла, має в собі значний виклик через низький рівень контрастності між райдужною оболонкою та зіницею. У порівнянні з методами, що використовують інфрачервоне світло, це ускладнює визначення точного положення зіниці, внаслідок чого в аналізі часто використовують положення центру райдужки як альтернативу. Такий підхід може призводити до певної неточності у вимірах, адже він не забезпечує ефективних механізмів для фільтрації шумів. Для підвищення точності необхідно впровадження алгоритмів обробки відеопотоку, які можуть краще розрізняти зіницю та райдужну оболонку, а також використання методів машинного навчання для вдосконалення точності визначення погляду на основі аналізу отриманих даних. Проте використання методів видимого спектру світла є безальтернативним у випадках, коли неможливо забезпечити освітлення інфрачервоним світлом, та коли камера не підтримує сприйняття інфрачервоного діапазону. Таким чином, застосування таких методів є доцільним у мобільному айтрекінгу та в айтрекінгу, що використовує веб-камери.

Методи на основі особливостей форми (Feature-Based Methods) використовують характерні риси очей (границя та контрастність зіниці, розподіл освітлення білка та інше) для визначення геометричних векторів, які відображають форму очей і положення голови для оцінки напрямку погляду. Перевагою таких методів є те, що зіницю і відблиски доволі легко знайти, і що ці ознаки можуть бути формально пов'язані з поглядом. Ці методи мають проблеми з продуктивністю в польових умовах та при сильному освітленні [70]. У [69] наводиться широкий огляд методів на основі особливостей форми.

Методи на основі моделей (Model-Based Methods) визначають напрям погляду, підбираючи моделі обличчя та очей до отриманого зображення. Ці методи спершу будують оптичну вісь ока, потім – вісь погляду, і, як результат, точка погляду визначається шляхом перетину осі погляду з геометрією сцени. Побудова осі погляду виконується шляхом знаходження рогівки та центру зіниці. Недоліком цього підходу є необхідність у використанні зображень очей з високою роздільною

здатністю, а також необхідність вручну калібрувати систему для кожного користувача з метою точного визначення розташування очей на обличчі. Перевага методів на основі моделей полягає в тому, що вони дозволяють визначати напрямок погляду, використовуючи прості характеристики обличчя, мінімізуючи необхідність в об'ємних даних для тренування для конкретної людини. [70]

Методи на основі перехресного співвідношення (Cross Ratio based Methods) дозволяють оцінити погляд за допомогою декількох джерел ІЧ-освітлення і виявлення їхніх відблисків на рогівці ока. У [71] описується метод на основі чотирьох інфрачервоних освітлювачів, а в [72] – на основі п'яти освітлювачів, завдяки яким виникає можливість уникнути додаткового калібрування. Перевагою таких методів є відсутність необхідності попереднього калібрування, проте використання додаткових джерел освітлення може накладати обмеження через неможливість їх використання з деякими пристроями.

Методи на основі оточення області очей (Appearance-Based Methods) використовують зображення очей як вхідні дані для знаходження точки погляду за допомогою машинного навчання. Ці методи здатні ефективно працювати з зображеннями низької якості, але вимагають значної кількості даних для тренування моделей. Хоча вони пропонують пряме перетворення зображення в точку погляду, вони стикаються з обмеженнями, пов'язаними з урахуванням положення голови, оскільки зміни в позі та напрямку погляду не завжди відображаються у зміні зовнішнього вигляду області очей. [69]

1.4.3. Алгоритми виявлення фіксацій

Ключовим етапом обробки даних айтрекінгу є виявлення фіксацій у потоці координат погляду. У роботі [73] запропоновано класифікацію алгоритмів виявлення фіксацій за двома групами критеріїв: просторовими (на основі швидкості, розсіювання або областей інтересу) та часовими (чутливість до тривалості, локальна адаптивність). Автори описують п'ять репрезентативних алгоритмів, кожен з яких втілює окремий підхід до розділення фіксацій і сакад.

I-VT (Identification by Velocity Threshold). Найпростіший з розглянутих методів. Для кожної точки протоколу обчислюється миттєва швидкість як відстань до наступної (або попередньої) точки. Якщо швидкість не перевищує заданого порогу, точка класифікується як фіксаційна, інакше – як сакадна. Послідовні фіксаційні точки об'єднуються у групи, центроїд яких стає координатою фіксації. Метод потребує лише одного параметра – порогу швидкості, який за відомої відстані до екрана може бути встановлений кутовою швидкістю. Перевагою є обчислювальна простота та придатність до роботи в реальному часі. Суттєвим недоліком є так званий ефект «сплесків» (blips): коли швидкість коливається поблизу порогу через шум обладнання, жорстка класифікація може розбивати одну фіксацію на кілька коротких фрагментів, що спотворює результати аналізу.

I-HMM (Identification by Hidden Markov Model). Метод, що замінює жорсткий поріг імовірнісною моделлю. Використовується прихована марковська модель із двома станами: один відповідає сакадним точкам (розподіл зосереджений на високих швидкостях), інший – фіксаційним (розподіл зосереджений на низьких швидкостях). Кожний стан характеризується ймовірностями спостережень та ймовірностями переходів між станами. Алгоритм декодування визначає для кожної точки протоколу найбільш ймовірну належність до стану фіксації або сакади з урахуванням послідовності сусідніх точок. Завдяки цьому I-HMM є локально адаптивним і значно краще справляється з шумом, ніж I-VT: проблемні ділянки, де I-VT генерує хибні «сплески», коректно об'єднуються в одну фіксацію. Параметри моделі можуть бути автоматично навчені з даних за допомогою процедури переоцінки. Основним недоліком є складність реалізації цієї процедури.

I-DT (Identification by Dispersion Threshold). Метод, що використовує не швидкість, а просторове розсіювання точок. Алгоритм працює з ковзним вікном, яке охоплює послідовні точки протоколу. Початковий розмір вікна визначається мінімальною тривалістю фіксації (зазвичай 100-200 мс) та частотою дискретизації. Для точок у вікні обчислюється розсіювання, якщо воно не перевищує заданого порогу, вікно розширюється, доки розсіювання не перевищить поріг; отримана

група точок реєструється як фіксація у центроїді. Якщо розсіювання перевищує поріг вже для початкового вікна, перша точка відкидається, і вікно зсувається. Метод потребує двох параметрів: порогу розсіювання та порогу тривалості, які є взаємозалежними. Завдяки вбудованому порогу тривалості I-DT уникає проблеми «сплесків», характерної для I-VT, і за якістю результатів наближається до I-NMM при значно простішій реалізації.

I-MST (Identification by Minimum Spanning Tree). Метод, побудований на мінімальному охоплюючому дереві. На першому кроці будується дерево, що з'єднує всі точки протоколу з мінімальною сумарною довжиною гілок. На другому кроці дерево аналізується: для кожної точки визначається максимальна глибина розгалуження, а для локальних груп гілок обчислюються статистичні характеристики (середнє та стандартне відхилення довжин). Гілки, довжина яких значно перевищує локальні параметри, інтерпретуються як сакади й розрізаються, а кластери точок, що залишилися, утворюють фіксації. Такий підхід є локально адаптивним – критерій поділу на фіксації та сакади автоматично підлаштовується під конкретну ділянку протоколу. Крім того, структура дерева дає змогу оцінити не лише положення та розмір, а й форму фіксації (через діаметр найдовшого шляху чи співвідношення довжини до ширини). Недоліком є обчислювальна складність: алгоритм потребує багаторазового обходу дерева й погано масштабується зі зростанням кількості точок, що обмежує його застосування в реальному часі.

I-AOI (Identification by Area of Interest). Метод, що виявляє фіксації лише в межах заздалегідь визначених областей інтересу. Кожна точка, що потрапляє в прямокутну область, маркується як фіксаційна для цієї області; точки поза областями вважаються сакадними. Послідовні фіксаційні точки для однієї області об'єднуються, а групи, тривалість яких менша за поріг, відкидаються. Метод корисний для аналізу вищого рівня, де важливо визначити час перебування погляду в конкретних зонах інтерфейсу. Однак він має суттєві обмеження: по-перше, точки сакади, що випадково проходять через область, хибно включаються до фіксації, завищуючи її тривалість; по-друге, фіксації поза визначеними областями повністю

ігноруються. Через ці недоліки автори визнають I-AOI найменш надійним серед розглянутих алгоритмів.

1.5. Аналіз існуючих досліджень мобільного айтрекінгу для оцінювання інтерфейсів

Застосування айтрекінгу дозволяє об'єктивно аналізувати поведінку користувачів, оцінюючи увагу, сприйняття дизайну та послідовність взаємодії з елементами інтерфейсу, що робить його одним із ключових інструментів для вивчення поведінки користувачів інтерфейсів. У сучасних дослідженнях мобільного айтрекінгу акцентується увага на подоланні технічних обмежень, таких як залежність від дорогого обладнання та складність калібрування.

Завдяки низькій вартості реалізації стають популярними системи, що базуються на фронтальних камерах смартфонів, а особливо ті з них, що використовують алгоритми глибокого навчання. У [47] було показано, що такі системи здатні забезпечити точність, достатню для базового аналізу інтерфейсу, хоча і поступаються професійним пристроям, таким як Tobii Pro Glasses. Водночас інші дослідження [74] підкреслюють важливість використання багатокамерних конфігурацій, які моделюють просторові координати ока, усуваючи потребу у традиційному калібруванні. Це відкриває перспективи для використання айтрекінгу в умовах, які раніше вважалися технічно складними, наприклад, у русі або при змінному освітленні.

Окрім технічних особливостей, у дослідженнях відображається потенціал айтрекінгу для вдосконалення взаємодії користувачів з інтерфейсом. Так в дослідженні [75] проводиться аналіз мобільного інтерфейсу мобільного AR-додатку Spotlight Timișoara, зокрема його здатності привертати увагу користувачів до ключових елементів дизайну. Айтрекінг допоміг ідентифікувати ділянки екрана, які найбільше привертають увагу користувачів, що дозволило оптимізувати розташування функціональних елементів. Наприклад, аналіз траєкторій погляду вказав, що користувачі схильні ігнорувати елементи, розташовані в нижній частині екрана. Таким чином, дослідження підтверджує, що айтрекінг є важливим

інструментом для аналізу дизайну мобільних додатків, включаючи ті, що мають AR-можливості. Оптимізація інтерфейсу на основі даних айтрекінгу дозволяє підвищити зручність використання додатків та залученість користувачів.

Разом із технічними інноваціями зростає увага до приватності даних. У дослідженні [76] було акцентовано, що дані про рухи очей можуть розкривати чутливу інформацію, включаючи інтереси, демографічні характеристики та навіть емоційний стан користувачів. Результати опитувань показали, що понад 75% користувачів виявляють занепокоєння через можливість зловживання їхньою особистою інформацією, зокрема оцінюванням емоційного стану чи поведінкових патернів без їхньої згоди. Автори рекомендують впровадження локальної обробки даних, щоб уникнути передачі чутливої інформації на сторонні сервери, та краще пояснювати, як працює айтрекінг і для чого збираються дані. Це підкреслює важливість балансу між технічними можливостями айтрекінгу та захистом персональних даних.

Не менш важливим залишається питання розробки методів динамічного відстежування погляду та візуалізації його результатів. Якщо статичні екрани можна відстежувати за допомогою простого відслідковування погляду, то для сценаріїв, що передбачають швидко змінюваний контент, інтерактивні елементи та активне використання жестів, необхідно розробити динамічні засоби відображення отриманих даних. В [77] класифіковано техніки візуалізації за просторово-часовими аспектами, в тому числі для динамічних стимулів, які використовують анімації або інтерактивні методи для збереження контексту. Такі підходи дозволяють створювати інтерфейси з анімованими картами уваги, які оновлюються в режимі реального часу та допомагають відстежувати зміни у поведінці користувачів під час взаємодії з інтерфейсом. Усе це відкриває можливості для глибшого вивчення поведінки користувачів, проте водночас вимагає відповідних технічних рішень і додаткових експериментів, що дозволять дослідникам перевірити, як подібні технології працюють у реальних ситуаціях.

1.6. Цілі та задачі дисертаційного дослідження

Проведений аналіз сучасного стану технологій айтрекінгу дозволяє зробити такі висновки:

По-перше, існуючі апаратні комплекси для айтрекінгу (настільні трекери, мобільні окуляри, системи для VR/AR) мають високу точність, але є дорогими, обмежують мобільність користувача та потребують складного калібрування. Мобільний та веб-камерний айтрекінг є перспективними, але менш точними напрямками.

По-друге, існуючі методи локалізації очей та гейз-трекінгу добре розвинені для систем з інфрачервоним освітленням, але потребують адаптації для роботи з видимим світлом та камерами мобільних пристроїв.

По-третє, відсутні цілісні методи оцінювання дизайну мобільних інтерфейсів, які б поєднували мобільний айтрекінг з набором адекватних метрик, класифікацією типів екранів та покроковою процедурою проведення дослідження окремо для статичних і для динамічних сценаріїв взаємодії.

По-четверте, вплив вікових та когнітивних характеристик користувачів на результати айтрекінгу мобільних інтерфейсів є недостатньо дослідженим.

На основі проведеного аналізу сформульовано такі задачі дисертаційного дослідження:

- провести аналіз існуючих апаратних комплексів, програмних засобів та методів айтрекінгу, визначити їх обмеження при застосуванні для дослідження мобільних інтерфейсів та сформулювати вимоги до методу оцінювання;
- розробити модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження, яка формалізує відповідність між фазами взаємодії та вимірюваними показниками погляду;
- розробити метод оцінювання дизайну статичних мобільних екранів на основі айтрекінгу, що включає набір метрик візуальної уваги, класифікацію типів екранів із визначенням пріоритетних зон інтересу та шестиетапний процес проведення дослідження;

- розробити метод оцінювання дизайну динамічних мобільних екранів на основі айтрекінгу, що використовує поняття часової зони інтересу з прив'язкою до координат повного документа і тайм-кодів та розширений набір метрик охоплення і залученості;
- розробити програмний засіб для проведення мобільних айтрекінг-досліджень на основі фронтальної камери смартфона;
- провести експериментальну валідацію розробленого методу та програмного засобу шляхом дослідження розподілу візуальної уваги на типових екранах мобільних додатків.

1.7. Висновки

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану технологій айтрекінгу. Розглянуто основні типи апаратних комплексів. Настільні трекари забезпечують точність 0,3-0,5°, але, по-перше, мають доволі високу ціну, а по-друге, обмежують дослідження лабораторними. Мобільні окуляри вирішують проблему мобільності, але також обмежують дослідників своєю вартістю. Наявні програмні рішення для фронтальних камер обмежені браузерним контекстом або закритою екосистемою без можливості кастомізації методики.

Проаналізовано параметри, що впливають на якість відслідковування. Досліджено методи локалізації очей та гейз-трекінгу, включаючи методи на основі форми, особливостей, перехресного співвідношення та зовнішнього вигляду. Проведено аналіз алгоритмів виявлення фіксацій. Алгоритм I-DT обрано як базовий для виявлення фіксацій з огляду на його обчислювальну простоту та достатню точність $\sim 1-2^\circ$, характерну для камерних систем.

Проведений аналіз дозволив виявити конкретні проблеми, які вирішує дана дисертаційна робота. Розглянуті системи не поєднують одночасно: мобільну платформу на основі стандартної фронтальної камери; нативну інтеграцію айтрекінгу у дослідницький процес без зовнішніх пристроїв; цілісну формалізовану методику оцінювання з класифікацією типів екранів та набором AOI-специфічних метрик.

2. МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ДИЗАЙНУ МОБІЛЬНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ АЙТРЕКІНГУ

2.1. Вступ

Розробка методу оцінювання мобільних інтерфейсів розпочалася з аналізу обмежень наявних підходів. Огляд айтрекінг-досліджень мобільних інтерфейсів показав, що більшість із них обмежується одним або двома аспектами: або використовують теплові карти як єдину метрику без прив'язки до типу екрану, або фіксують час виконання завдання без урахування стратегій переміщення погляду. Жодне з розглянутих досліджень не встановлює систематичної відповідності між типом екрану і набором пріоритетних метрик візуальної уваги. Це унеможлиблює порівняння результатів та не дає інструменту для локалізації проблеми ще до початку збору даних.

У другому розділі розроблено два методи, що усувають зазначені обмеження. Метод оцінювання статичних екранів поєднує формалізовану систему метрик візуальної уваги, класифікацію типів екранів мобільних додатків із визначенням пріоритетних областей інтересу та шестиетапну процедуру проведення дослідження. Поєднання об'єктивних метрик з обов'язковими суб'єктивними оцінками після кожного завдання стало ключовою методологічною відмінністю від інших протоколів, що дозволило виявити розбіжності між різними групами респондентів. Метод оцінювання динамічних екранів розроблено як самостійне доповнення для сценаріїв, де контент екрану змінюється під час сесії: прокручування, навігаційні переходи, відеоконтент, інтерактивні переходи. У таких умовах стандартна AOI, прив'язана до статичних координат екрану, реєструє фіксації для зон, яких уже немає у видимій ділянці, або пропускає зони, що щойно з'явилися. Метод вирішує цю проблему через введення часової зони інтересу (Temporal AOI, T-AOI), синхронну реєстрацію стану інтерфейсу та розширений набір метрик охоплення і залученості.

2.2. Система метрик візуальної уваги

Для об'єктивного оцінювання якості дизайну мобільних інтерфейсів запропоновано систему метрик, що характеризують різні аспекти візуальної уваги користувача. Кожна метрика має чітке формальне визначення та інтерпретацію для прийняття дизайнерських рішень. [78]

- Час до першої фіксації (Time to First Fixation, T_{ff}). Визначається як інтервал часу від моменту відображення екрану до моменту першої фіксації погляду в межах заданої області інтересу (AOI). Він відображає помітність та доступність елемента. Менший T_{ff} вказує на більшу помітність елементу інтерфейсу. Дослідження показують, що швидке виявлення важливих елементів значно знижує когнітивне навантаження під час виконання завдань.

- Тривалість фіксації (Fixation Duration, T_{fd}). Відображає час, протягом якого погляд користувача залишається зосередженим на певному елементі або зоні уваги. Довгі фіксації можуть свідчити про зосередження уваги, але також можуть сигналізувати про труднощі в обробці інформації, якщо елемент не є інтуїтивно зрозумілим.

- Частота фіксацій (Fixation Frequency, F_f). Показує кількість разів, коли користувач звертав увагу на певний елемент чи зону інтерфейсу. Висока частота може свідчити про складність виконання завдання або про важливість цієї зони.

- Траєкторія погляду (Scan Path). Цей параметр аналізує послідовність переміщення погляду між елементами інтерфейсу. Він допомагає визначити, наскільки логічно побудована структура інтерфейсу та чи відповідає вона очікуванням користувача. Дослідження [79] підкреслює, що для різних типів інтерфейсів, таких як мобільні або веб-дизайни, існують певні закономірності у переміщенні погляду, наприклад, схильність фіксуватися на верхньо-лівих зонах екрану.

- Теплові карти (Heatmaps). Графічна візуалізація зон, які привертають найбільшу увагу користувачів. Теплові карти дозволяють виявити, чи розташовані

важливі елементи в зонах, що отримують максимальну увагу, та визначити області, які ігноруються.

- Час взаємодії з екраном (Time Spent on Screen, T_s). Цей параметр вимірює тривалість, протягом якої користувач залишається на одному екрані перед переходом до наступного. Він є важливим показником залученості та складності взаємодії з конкретним екраном.

- Частота перегляду несуттєвих зон (Non-AOI Fixation Frequency). Вимірює кількість фіксацій на зонах, які не мають функціонального значення. Висока частота може свідчити про відволікаючі фактори або погану організацію інтерфейсу.

2.3. Класифікація типів екранів та визначення областей інтересу

Особливу увагу в оцінюванні варто приділити екранам, де помилка або затримка взаємодії мають практичні наслідки. Для кожного типу таких екранів нижче визначено склад зон інтересу та пріоритетні метрики.

Екрани підтвердження транзакцій (фінанси). Такі екрани є критично важливими, адже від них залежить успішність та безпечність фінансових операцій. На цьому екрані користувач зазвичай бачить ключові дані: ім'я чи номер рахунку одержувача, суму, комісію та інформацію про те, з якого рахунку здійснюється оплата. З точки зору користувацького досвіду, надзвичайно важливо, щоб ці поля були помітні при взаємодії з додатком. У ході айтрекінг експерименту користувачеві необхідно запропонувати ознайомитися з даними переказу й підтвердити його, звернувши увагу на правильність суми та реквізитів. Зоною інтересу (AOI) тут є поля суми, комісії та кнопка «Підтвердити» (Рисунок 2.1), а одним із ключових показників – час до першої фіксації T_{ff} , який показує, наскільки швидко користувач помічає ці зони після відкриття екрану.

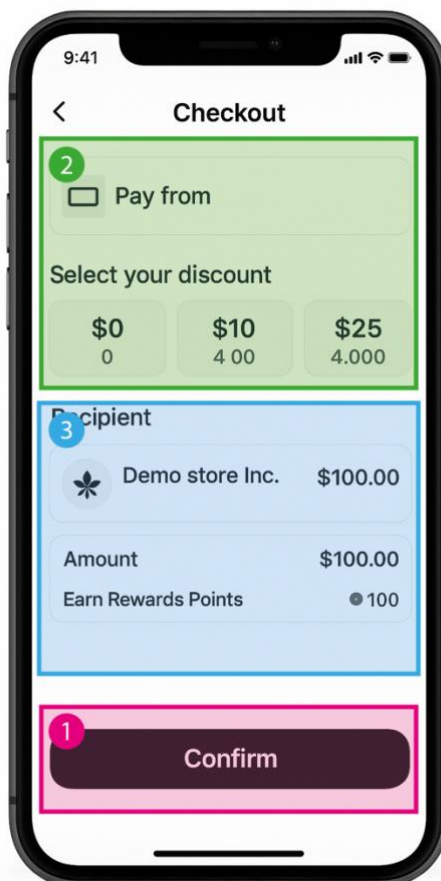


Рисунок 2.1 – Розмітка зон інтересу (AOI) для айтрекінг дослідження.

Дослідження [80] демонструє ефективність використання айтрекінгу на базі мобільних пристроїв у контексті фінансових операцій, особливо у мобільному банкінгу. Їхній підхід дозволяє отримувати точні дані про візуальну увагу користувачів навіть без спеціалізованого обладнання, що є важливим у ситуаціях, коли необхідно вчасно оцінити коректність критичних даних. Додатково необхідно аналізувати частоту фіксацій F_f , щоб зрозуміти, як часто й надовго погляд повертається до полів із сумою чи комісією. Траєкторія переміщення погляду *Scan Path* дає уявлення про те, чи користувач послідовно перевіряє всі критичні пункти або одразу шукає кнопку «Підтвердити», ігноруючи решту деталей. Низький час до першої фіксації на сумі та комісії свідчатиме про те, що структура екрана дозволяє швидко оцінити коректність фінансової операції, а часті повернення до кнопки можуть вказувати на її виразну помітність.

Екрани медичних результатів. Мають надзвичайно відповідальну роль, адже користувач часто спирається на відображені показники здоров'я під час ухвалення рішень. Зазвичай такі екрани містять перелік аналізів, їхні нормативні значення та фактичні результати. Щоб перевірити, наскільки добре користувач орієнтується в цих даних, необхідно провести експеримент, де учасникам буде запропоновано визначити, чи результати певного аналізу в нормі або перевищують референтні межі. В цьому випадку зоною інтересу є блоки з позначеннями цих аналізів. Окрім часу до першої фіксації T_{ff} , необхідно аналізувати середню тривалість фіксації на критичних показниках (наприклад, коли результат значно виходить за межі норми). Це дає змогу оцінити, чи достатньо чітко виділені дані про потенційний ризик. Аналіз теплових карт дозволяє побачити, чи не зосереджений погляд користувачів на незначущій інформації, замість того щоб акцентуватися на небезпечних відхиленнях. Якщо час до першої фіксації на ключових значеннях є високим або користувачі часто повертаються до легенди чи пояснень, це свідчить про необхідність посилення контрасту, використання зрозумілих кольорових позначок та спрощення структури екрану. Паралельно, тривалість фіксацій на зоні інтересу показує, чи потребують показники додаткового акценту або кращого форматування. Дослідження [81] підтверджує, що ефективність подання інформації в медичних додатках може бути значно підвищена за рахунок оптимізації візуального дизайну та акценту на ключових показниках здоров'я.

Навігаційні карти. Такі екрани зазвичай містять маршрут, поточне місцезнаходження користувача, дорожні вказівки та кілька інтерактивних іконок для доступу до додаткових опцій, наприклад «Пошук заправки», «Об'їзд», «Паркування». У рамках експерименту користувачам необхідно запропонувати ознайомитися із картою і знайти функцію пошуку паркування. Якщо іконка чи кнопка пошуку паркування не досить контрастна або розташована незвично, час до першої фіксації T_{ff} може бути вищим, а траєкторія переміщення погляду *Scan Path* може свідчити про блукання між іншими елементами. У дослідженні [82] наголошують, що ефективна структура інтерфейсу карти значно покращує

швидкість сприйняття ключових елементів, таких як кнопки для навігації чи пошуку об'єктів. Частота фіксацій F_f на навколишніх іконках допомагає з'ясувати, чи не перевантажений екран зайвими елементами. Якщо результати аналізу показують, що кнопка пошуку паркування лишається менш поміченою порівняно з іншими іконками, це свідчить про необхідність змін у дизайні (колір, розмір, положення на карті), аби полегшити доступ до важливої функції. У контексті такого дослідження особливо важливо відтворювати умови реального водіння або принаймні імітувати їх (за допомогою симулятора). Під час керування автомобілем користувач має обмежений час на взаємодію з екраном, і кожен додатковий крок або непомітна іконка можуть відволікати увагу від дороги. Тому варто застосовувати айтрекінг із використанням вбудованої камери, яка в реальному часі фіксуватиме напрям погляду водія в природних умовах чи у спеціально обладнаному тренажері. Дані айтрекінгу з вбудованою камерою, поєднані з інформацією про швидкість та дорожню ситуацію, дають змогу найбільш достовірно оцінити ефективність дизайну навігаційного екрану саме в умовах, наближених до реального керування.

Каталоги e-commerce. Сторінки перегляду товарів є одними з найбільш досліджуваних типів мобільних екранів: конверсія безпосередньо залежить від того, наскільки швидко користувач виявляє цільовий товар і помічає ключові атрибути (ціну, акційну пропозицію, СТА-кнопку). Такі екрани зазвичай реалізовані у вигляді вертикального списку, де товари розташовані у формі стрічки, або у вигляді карток, де товари відображаються у вигляді сітки. Згідно з дослідженням [83], різні групи користувачів можуть демонструвати суттєво відмінну поведінку під час перегляду товарів залежно від їхнього досвіду взаємодії з мобільними додатками. Щоб визначити, який із цих варіантів є більш зручним і ефективним, необхідно провести експеримент за участі користувачів. У ході експерименту користувачам пропонується виконати завдання: знайти певний товар у представленому переліку. Заздалегідь визначається, який товар буде цільовим, і ця зона визначається як зона інтересу (Area of Interest, AOI). Айтрекінг

використовується для відстеження погляду користувачів у реальному часі, дозволяючи фіксувати метрики, які характеризують взаємодію. Зокрема, одним із ключових показників є час до першої фіксації T_{ff} , який вимірює, скільки часу потрібно користувачеві для того, щоб зафіксувати погляд на цільовому товарі. Результати такого експерименту дають можливість оцінити ефективність кожного дизайну. Наприклад, якщо час до першої фіксації значно нижчий у випадку карточок, це може свідчити про те, що структура сітки забезпечує краще сприйняття інформації та швидше орієнтування. Ще одним ключовим екраном у e-commerce додатках є сторінка товару, на якій користувач виконує основну конверсійну дію – покупку або додавання товару в кошик. Одним із найважливіших аспектів аналізу цього екрану є помітність кнопки, яка спонукає до конверсійної дії. Помітність кнопки залежить від її розташування, розміру та кольору, що може суттєво впливати на поведінку користувача. Наприклад, варіації кольору (зелений, червоний або синій) або збільшення розміру кнопки можуть покращити її видимість і, відповідно, ефективність. Зоною інтересу (AOI) у цьому випадку виступає сама кнопка, і для її аналізу необхідно враховувати кілька ключових параметрів. По-перше, час до першої фіксації T_{ff} дозволяє оцінити, наскільки швидко користувач помічає кнопку після початку взаємодії з екраном. По-друге, частота фіксацій F_f на кнопці показує, як часто користувач повертається до неї, скануючи інші елементи сторінки. Це може свідчити про її значимість або, навпаки, про необхідність покращення дизайну, якщо кнопка є недостатньо помітною. Крім того, траєкторія переміщення погляду Scan Path дає змогу зрозуміти, як користувач досліджує екран і які елементи відволікають його увагу перед тим, як він повернеться до кнопки.

Текстові екрани. Такі екрани часто зустрічаються в додатках для опису продуктів, додаткової інформації, читання книжок, статей чи новин. Основною гіпотезою айтрекінг аналізу цих екранів є те, що більший розмір шрифту, його контрастність і загальний дизайн тексту полегшують його сприйняття та сприяють швидшому прочитанню. Для перевірки цієї гіпотези необхідно тестувати такі

параметри, як розмір шрифту, міжрядковий інтервал, сімейство шрифтів, контрастність тексту відносно фону, а також ефективність використання темної теми у мобільних додатках. Айтрекінг дозволяє вимірювати кілька важливих параметрів для аналізу текстового контенту. Одним із ключових показників є час від першої фіксації до останньої, що дозволяє оцінити загальний час, необхідний для сприйняття тексту на екрані. Крім того, важливо аналізувати середню швидкість прочитання одного рядка тексту, яка залежить від зручності шрифту, інтервалів і кольорової схеми. Дослідження [84] показує, що читання на екранах смартфонів, особливо з контентом, що прокручується, впливає на концентрацію користувача, і що користувачі мають тенденцію фокусуватися на певних ділянках екрана. Вивчення траєкторії погляду *Scan Path* допомагає зрозуміти, наскільки послідовно користувачі переміщуються по тексті, чи виникають у них труднощі зі сприйняттям або повернення до попередніх рядків. Дослідження [84] також підтверджує, що користувачі віддають перевагу «блоковому» читанню, тобто концентруються на центральних або верхніх частинах екрану, а решта зони екрану використовується менше. Теплові карти дозволяють оцінити, чи привертають ключові текстові блоки увагу користувачів або ж їхнє розташування та оформлення викликають плутанину. Наприклад, якщо увага користувачів концентрується на малозначущих зонах, а важлива інформація ігнорується, це може свідчити про необхідність змін у дизайні текстових блоків. Таким чином, айтрекінг дозволяє не лише підтвердити гіпотезу про вплив розміру, стилю та кольору тексту на його читабельність, а й виявити приховані проблеми, які заважають користувачам отримати доступ до важливої інформації.

2.4. Класифікація динамічних екранів мобільних інтерфейсів та їх зони інтересу

Класифікація статичних типів екранів, наведена у підрозділі 2.3, охоплює ситуації, де весь контент відображається на екрані одночасно і зони інтересу залишаються на одному місці впродовж усієї взаємодії. Але багато реальних

мобільних інтерфейсів мають контент, що динамічно змінюється: екрани прокручуються, переходи між екранами супроводжуються анімацією, елементи з'являються і зникають. У таких сценаріях стандартна АОІ-розмітка, прив'язана до координат екрану, не дає повну картину розподілу уваги користувача: фіксація реєструється для АОІ, яка в момент запису вже зникла, або, навпаки, не реєструється для АОІ, що щойно з'явилась у видимій зоні.

Для вирішення цієї проблеми нижче запропоновано класифікацію динамічних екранів за типом і джерелом зміни стану. Класифікація є доповненням до типології статичних екранів і застосовується паралельно з нею: той самий екран може водночас бути «медичним» та «прокручуваний» за динамічним типом.

2.4.1. Типологія динамічних екранів

Виділено чотири типи динамічних екранів, що відрізняються механізмом зміни стану та наслідками для методики АОІ-аналізу.

Екрани з прокручуванням контентом. Такі екрани розповсюджені практично у всіх видах додатків і характеризуються тим, що видима область є рухомим вікном над повним контентом, яке переміщується жестом користувача. Для таких екранів одна й та сама АОІ може по чергову входити у видиму зону і виходити з неї. Момент появи зони інтересу залежить від індивідуальної швидкості та глибини прокрутки. Варто зазначити, що за даними аналізу веб-сесій [85], середній показник прокрутки сторінок на мобільних пристроях становить 48% від висоти сторінки, тобто більшість користувачів не досягає навіть середини сторінки. Для мобільних додатків очікується схожа глибина прокрутки через схожість з мобільними веб-інтерфейсами. Для міжсесійного порівняння показників уваги необхідно коректно вимірювати час до першої фіксації T_{ff} : не від моменту відкриття екрану, а від появи зони інтересу на екрані.

Екрани з навігаційними переходами. Навігаційні переходи охоплюють анімаційні стани між двома стабільними екранами: розкриття модальних вікно, перетікання елемента одного екрану в інший, тощо. Такі переходи, як правило, займають від 200 до 400 мс, а фіксації, зареєстровані в цей інтервал, не можуть бути

однозначно прив'язані ані до першого, ані до наступного екрану. Тому при підрахунку часу до першої фіксації на зоні інтересу необхідно виключати ці інтервали, подібно до вимірювання на екранах з прокрученням.

Екрани з анімованими елементами інтерфейсу. Такі анімовані елементи включають мікро анімації, що змінюються незалежно від дій користувача: пульсуючі кнопки, індикатори завантаження, анімовані іконки станів. На відміну від навігаційних переходів, такі елементи можуть змінюватись впродовж усього експерименту, і момент першої фіксації може вимірюватись залежно від фази анімації.

Екрани з відео-контентом. Такі екрани об'єднують стимули, де зміна контенту відбувається за часовим розкладом: промо-ролики, карусельні блоки з авто-прокруткою, анімовані заставки. Для цього типу особливо значущою є прив'язка до тайм-коду: той самий кадр відео може бути як інформативним, так і перехідним залежно від секунди перегляду.

2.4.2. Додаткові метрики для динамічних екранів

Для всіх чотирьох типів динамічних екранів традиційна статична АОІ, визначена у координатах екрану, є недостатньою. Дослідження [86] показало, що у мобільних дослідженнях об'єкти інтересу рухаються нелінійно, зникають і з'являються знову, внаслідок чого стандартні інструменти аналізу АОІ виявляються непридатними і дослідники змушені вдаватися до трудомісткої ручної анотації. Дослідження [87] додатково встановило, що у середовищах із динамічним інтерфейсом необхідно розрізняти статичні АОІ та зони, що динамічно з'являються або змінюються залежно від стану системи. Спираючись на ці методологічні передумови, вводиться поняття часової зони інтересу (Temporal АОІ, Т-АОІ), що визначається простором повного документа та тайм-кодом і є активною лише у ті моменти, коли вона знаходиться у видимому вікні перегляду.

Для екранів з прокручуванням контентом Т-АОІ задається координатами у системі повного документа. У кожен момент часу активними є лише ті Т-АОІ, чие вертикальне розташування перетинається з поточним видимим вікном. Позиція

прокручування записується з тією самою частотою дискретизації, що й координати погляду, і отримує спільний часовий штамп. Метрика T_{ff} для екранів з прокручуванням контентом розраховується від моменту першої появи Т-АОІ у видимому вікні, а не від відкриття екрану.

Для екранів з навігаційними переходами інтервал від початку до закінчення анімації переходу виключається з аналізу повністю. Усі фіксації, зареєстровані в цьому інтервалі не включаються до жодної АОІ. Тривалість переходу документується для кожного типу переходу в конкретному інтерфейсі. Якщо частка виключених фіксацій перевищує 15% від загальної тривалості завдання, це є діагностичним сигналом надмірно тривалих або частих анімацій у дизайні.

Для екранів з відеоконтентом зони Т-АОІ задаються тайм-кодами: кожна Т-АОІ активна лише протягом того відрізка часу, коли відповідний елемент є стабільним і видимим. Фіксації під час різких змін кадру виключаються за тим самим принципом що й для екранів з навігаційними переходами.

Окрім часової зони інтересу, для екранів з прокручуванням контентом необхідно вимірювати три додаткові метрики, що характеризують сам процес прокрутки як окремий поведінковий феномен.

Глибина прокрутки (Scroll Depth, SD). Це максимальна вертикальна позиція, що досягається користувачем, виражена у відсотках від повної висоти контенту. Ця метрика характеризує охоплення контенту незалежно від тривалості фіксацій. Навіть якщо учасник прокрутив до нижньої частини екрану без фіксацій, це є важливою поведінковою інформацією. [88]

Швидкість прокрутки (Scroll Velocity, SV). Це середня швидкість жесту прокрутки у пікселях за секунду, обчислена по всій сесії з конкретним екраном. Повільне прокручування (< 300 пікселів за секунду) з регулярними фіксаціями відповідає стратегії уважного читання; швидке прокручування (> 1000 пікселів за секунду) без фіксацій характеризує навігаційний жест або втрату зацікавленості [89].

Кількість зупинок прокрутки (Scroll Stops, SS). Це число інтервалів тривалістю понад 500 мс, протягом яких позиція скролу залишається незмінною. Зупинки фіксують моменти утримання уваги; зіставлення їх позицій із Т-АОІ дозволяє встановити, які саме зони контенту утримали увагу настільки, що учасник припинив прокрутку. Поріг 500 мс відповідає мінімальній тривалості прочитання одного рядка тексту середнього розміру і є нижньою межею, нижче якої зупинка вважається технічним артефактом жесту, а не поведінковим сигналом [90].

Для кожного типу динамічного екрану пріоритетні показники різняться залежно від механізму зміни стану.

Для екранів із прокручуванням контентом основною метрикою охоплення є глибина прокрутки SD , що відображає, якої частини сторінки фізично досяг користувач. Первинною метрикою помітності є час до першої фіксації T_{ff} , який відраховується від моменту появи часової зони інтересу Т-АОІ у видимій ділянці екрану. Кількість зупинок прокрутки SS виступає метрикою залученості. Якщо глибина прокрутки до цільової зони інтересу становить менше 70% від вибірки, проблема локалізована ще до рівня помітності, оскільки більшість учасників фізично не досягла відповідної зони.

Для екранів із навігаційними переходами діагностичною метрикою якості анімації є частка виключених фіксацій, зафіксованих у межах переходів. Метрикою орієнтування після переходу є час до першої фіксації T_{ff} на першому цільовому елементі нового екрану, що розраховується від завершення переходу.

Для екранів з анімованими елементами час до першої фіксації аналізується у прив'язці до фази анімаційного циклу, що дозволяє встановити, чи є перша фіксація результатом цілеспрямованого пошуку, чи реакцією на рух. Частота повторних фіксацій на анімованому елементі виступає метрикою привертання уваги рухом.

Для екранів із відеоконтентом час до першої фіксації T_{ff} визначається відносно часового коду першої появи елемента у кадрі. Частота повторних переглядів того самого фрагмента є метрикою повторного звернення до інформації.

2.5. Модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження

Для того, щоб описані система метрик візуальної уваги та класифікація типів екранів із відповідними зонами інтересу сформували цілісну процедуру, необхідно розкрити питання яким чином відбувається взаємодія між користувачем і мобільним інтерфейсом у момент айтрекінг-дослідження, а також де в цьому процесі можуть виникати проблеми, що будуть підтверджені метриками. Відхилення T_{ff} від орієнтовного значення може бути зумовлено різними причинами: тим, що елемент не потрапив у центральну зону зору, або тим, що він не був розпізнаний як значущий, або ж тим, що він не викликав достатньої поведінкової реакції. Ці три причини потребують різних вирішень, і для їхньої ідентифікації необхідний формалізований опис процесу взаємодії.

З цією метою розроблено модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження. Вона виконує інтерпретаційну функцію: отримані метрики прив'язуються до конкретної фази взаємодії, де відбулося відхилення від очікуваного перебігу. Це дозволяє формувати дизайн-рекомендації, цілеспрямовані саме на ту частину процесу, яка має проблему, а не на інтерфейс у цілому.

2.5.1. Структура моделі

Модель (рисунок 2.2) описує інформаційну взаємодію як послідовність чотирьох фаз, що реалізуються при кожному зверненні користувача до елемента інтерфейсу. Фази жорстко не відокремлені у часі і можуть перекриватися і повторюватися, але кожна з них має власний інформаційний зміст і відповідний показник у метриках погляду.

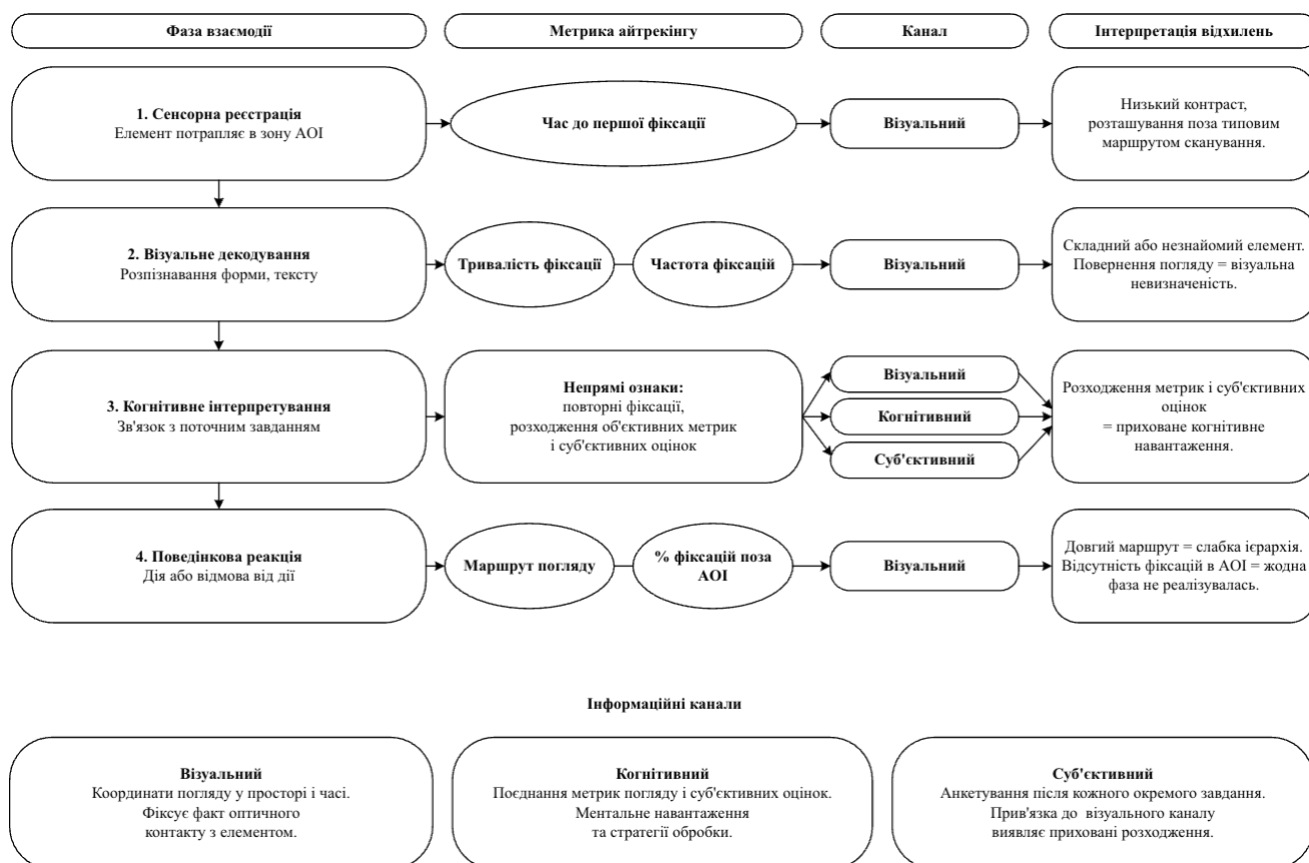


Рисунок 2.2 – Модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження

Фаза 1. Сенсорна реєстрація. Поле зору людини охоплює близько 120 градусів по горизонталі, але лише центральна зона у 2-5 градусів забезпечує достатню гостроту для розпізнавання тексту і дрібних елементів [85]. Фаза сенсорної реєстрації завершується, коли елемент потрапляє до цієї зони, тобто коли погляд досягає зони інтересу AOI та утримується в ній не менше тривалості, необхідної для формування фіксації. Відповідним показником для цієї фази в айтрекінг-даних є час до першої фіксації T_{ff} : він відображає не лише помітність елемента, а й час, протягом якого сигнал про його присутність взагалі не надходив у центральну зону поля зору. Тривалий час до першої фіксації T_{ff} може бути зумовлений низьким візуальним контрастом елемента, його розташуванням за межами типового маршруту сканування або конкуренцією з суміжними елементами.

Фаза 2. Візуальне декодування. Після того як елемент потрапив у фокус погляду, починається активна фаза декодування: мозок користувача розпізнає форму, колір, розмір, текст та просторову позицію, формуючи візуальний образ. Тривалість цієї фази залежить від складності та впізнаваності елемента. Для добре знайомих патернів ця фаза буде мінімальною. Для незнайомих або перевантажених елементів тривалість фази суттєво подовжується. Показник, що характеризує цю фазу є тривалість фіксації T_{fd} : довга одиночна фіксація без переміщень погляду зазвичай відповідає інтенсивному візуальному опрацюванню. Якщо після тривалої фіксації погляд переміщується на суміжний елемент і повертається назад, це сигнал візуальної невизначеності.

Фаза 3. Когнітивне інтерпретування. Користувач встановлює зв'язок між виявленим елементом і поточним завданням: розуміє функцію кнопки, інтерпретує значення числового показника, визначає, чи потрібна йому ця інформація. Саме на цій фазі виникають найбільші міжгрупові відмінності: досвідченіші користувачі витрачають на інтерпретацію менше когнітивних ресурсів оскільки вже мають відповідний досвід. Ця фаза не має прямого однозначного показника в айтрекінг-даних, однак її проблеми відображаються у двох непрямих ознаках: повторних фіксаціях на тому самому елементі після переведення погляду та у розходженні між об'єктивними метриками і суб'єктивною оцінкою зручності, коли погляд фіксується нормально, але учасник повідомляє про труднощі.

Фаза 4. Поведінкова реакція. Завершивши інтерпретацію, користувач ухвалює рішення про дію або свідомо відмовляється від неї. Фаза поведінкової реакції реалізується у формі дотику до екрана, вербального коментаря або паузи. Маршрут погляду і частота фіксацій поза АОІ є показниками для цієї фази. Якщо перед цільовим елементом зафіксовано значну кількість фіксацій у нерелевантних зонах, це свідчить про те, що маршрут до поведінкової реакції є надмірно довгим через неоптимальне розміщення елемента або слабку візуальну ієрархію екрану. Частка учасників, які взагалі не зафіксували погляд в АОІ під час завдання, є граничним

показником: відсутність фіксації означає, що жодна з попередніх фаз не реалізувалась і поведінкова реакція на цей елемент виявилась неможливою.

2.5.2. Інформаційні потоки та канали передачі

Кожна фаза взаємодії реалізується через один або декілька інформаційних каналів. Модель виділяє три таких канали, що функціонують у процесі дослідження одночасно, але передають принципово різні типи інформації.

Візуальний канал є первинним і єдиним безпосереднім джерелом даних для айтрекінгу. Він відображає розподіл зорової уваги у просторі та часі: які елементи потрапили до центральної зони поля зору, у якій послідовності, на яку тривалість. Обмеження цього каналу полягає у тому, що він фіксує лише факт оптичного контакту між поглядом і елементом, але не несе інформації про те, чи відбулося розуміння.

Когнітивний канал не піддається прямому вимірюванню і реконструюється за непрямыми ознаками, переважно через поєднання даних візуального каналу з суб'єктивними оцінками учасника. Саме цей канал несе інформацію про ментальне навантаження, стратегії обробки та рівень інтерпретаційної складності елемента. Розходження між об'єктивними метриками погляду і суб'єктивними оцінками зручності є основним індикатором когнітивного навантаження, яке не відображається у поведінкових показниках.

Суб'єктивний канал реалізується через анкетування після кожного окремого завдання. Він передає узагальнену оцінку досвіду взаємодії, пережитого учасником, і є єдиним джерелом інформації про афективну складову взаємодії: відчуття легкості, впевненості або дискомфорту. Поекранна прив'язка суб'єктивного каналу до відповідних метрик візуального каналу дозволяє виявляти розходження між тим, що вимірюється, і тим, що переживає користувач.

2.6. Метод оцінювання ефективності дизайну статичних мобільних інтерфейсів

Запропонований метод є структурованою процедурою оцінювання якості дизайну мобільних інтерфейсів, у якій об'єктивні дані айтрекінгу і суб'єктивні

відгуки учасників розглядаються як джерела інформації, що взаємо доповнюють один одного, а не як альтернативні підходи. Принципова відмінність від наявних підходів полягає в тому, що аналітична основа дослідження формується до початку збору даних, виходячи з типу інтерфейсу, що тестується, а не формується на основі отриманих результатів після експерименту. Тип екрану та зони інтересу АОІ визначаються на підготовчому етапі, завдяки чому стає можливим коректне порівняння між сесіями: в усіх сесіях вимірюються ті самі параметри в тих самих зонах. Крім того, суб'єктивне оцінювання зручності проводиться після кожного окремого завдання, а не наприкінці сесії, що дозволяє безпосередньо зіставити об'єктивні метрики погляду із суб'єктивними враженнями для кожного тестового екрану.

Метод спирається на три взаємопов'язані складові. Першою є формалізована система метрик візуальної уваги, що охоплює час до першої фіксації, тривалість та частоту фіксацій, маршрут погляду, теплові карти та частку фіксацій в та поза АОІ. Другою складовою є типологія екранів із визначенням пріоритетних зон інтересу для кожного типу додатку. Завдяки цьому задається конкретний набір параметрів, що підлягають вимірюванню, залежно від функціонального призначення екрану. Третьою складовою є шестистапний процес проведення дослідження, що охоплює весь цикл від постановки завдань до верифікації внесених у дизайн змін.

Метод застосовується як у лабораторних умовах зі спеціалізованим обладнанням, так і в польових з мобільним айтрекінгом на основі вбудованої камери смартфона. Результатом є аналітичний звіт із кількісними показниками уваги по кожній АОІ, тепловими картами та маршрутами погляду, зіставленими із суб'єктивними оцінками, а також переліком проблемних зон і рекомендаціями щодо вдосконалення дизайну. Загальна схема методу подана на рисунку 2.3.

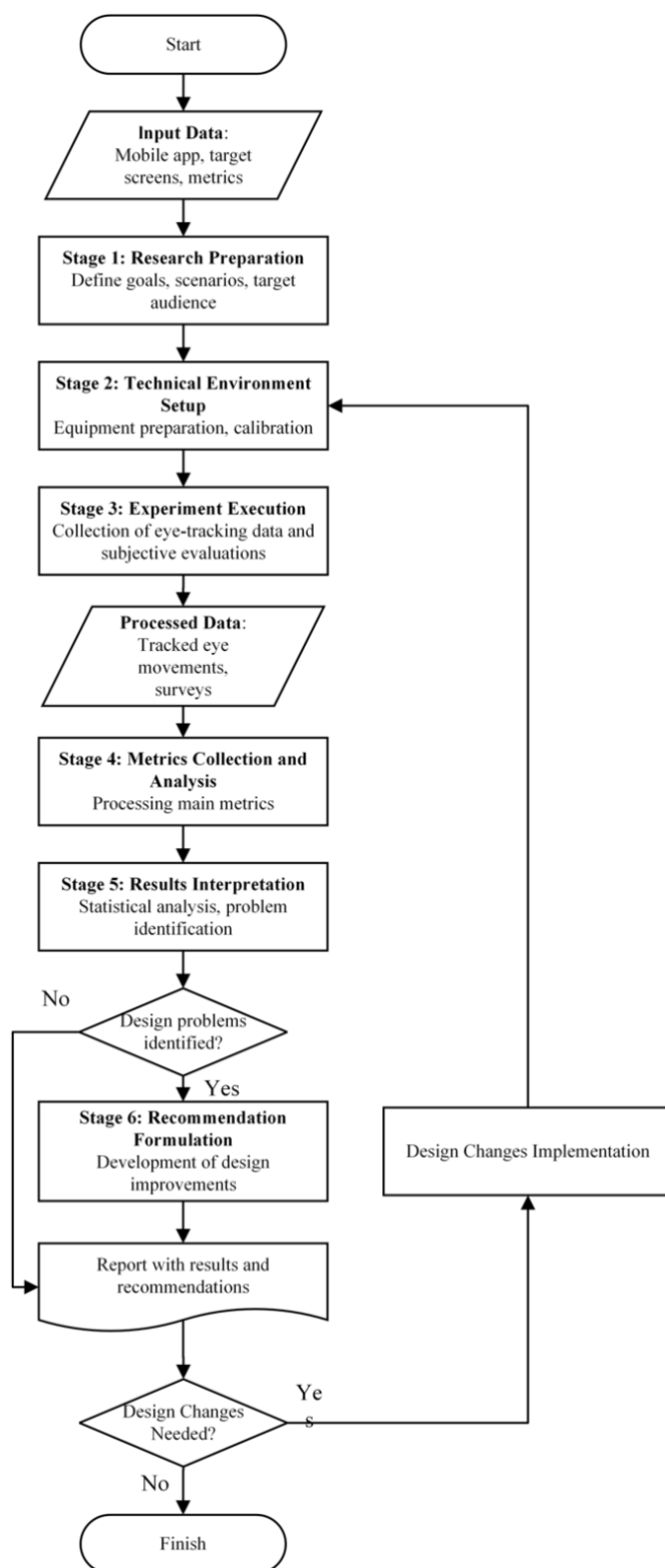


Рисунок 2.3 – Загальний алгоритм методу оцінювання дизайну статичних мобільних інтерфейсів з використанням айтрекінгу

Метод реалізується у шість послідовних етапів. На кожному з них визначено вхідні умови, дії дослідника та фіксований підсумок, без якого перехід до наступного етапу є неприпустимим.

Етап 1. Визначення об'єкта та цілей дослідження.

Дослідник формулює конкретні питання щодо кожного екрану, що тестується: наприклад, чи помічає користувач критичний елемент упродовж перших трьох секунд взаємодії або чи відволікає другорядний елемент увагу від ключової зони. Кожен екран класифікується відповідно до типології, наведеної в розділі 2.3, що дозволяє одразу визначити набір АОІ та первинні метрики до початку збору даних.

Підсумок: перелік тестованих екранів із типологічною класифікацією; перелік АОІ для кожного екрану; сформована вибірка учасників.

Етап 2. Налаштування технічного середовища.

Обирається технологія айтрекінгу: спеціалізоване обладнання або мобільний айтрекінг. Стандартизуються умови проведення: рівномірне освітлення, відстань 30-40 см між обличчям учасника та екраном, повноекранний режим застосунку. Готуються матеріали завдань і коротка анкета суб'єктивного оцінювання, яку учасник заповнює після взаємодії з кожним екраном. Технічні параметри середовища документуються для забезпечення відтворюваності.

Підсумок: задокументована конфігурація обладнання та програмного забезпечення; готові матеріали завдань і анкети.

Етап 3. Проведення експериментальної сесії.

Перед кожною сесією виконується індивідуальне калібрування айтрекінг-системи: учасник послідовно фіксує погляд на калібрувальних точках по всій площі екрану (рисунок 2.4). За незадовільної якості калібрування процедуру повторюють; якщо стабільного результату досягти не вдається, дані цього учасника виключаються. Після успішного калібрування учасник виконує підготовлені завдання у визначеній послідовності без підказок щодо очікуваної поведінки. Після взаємодії з кожним екраном учасник заповнює анкету суб'єктивного оцінювання.

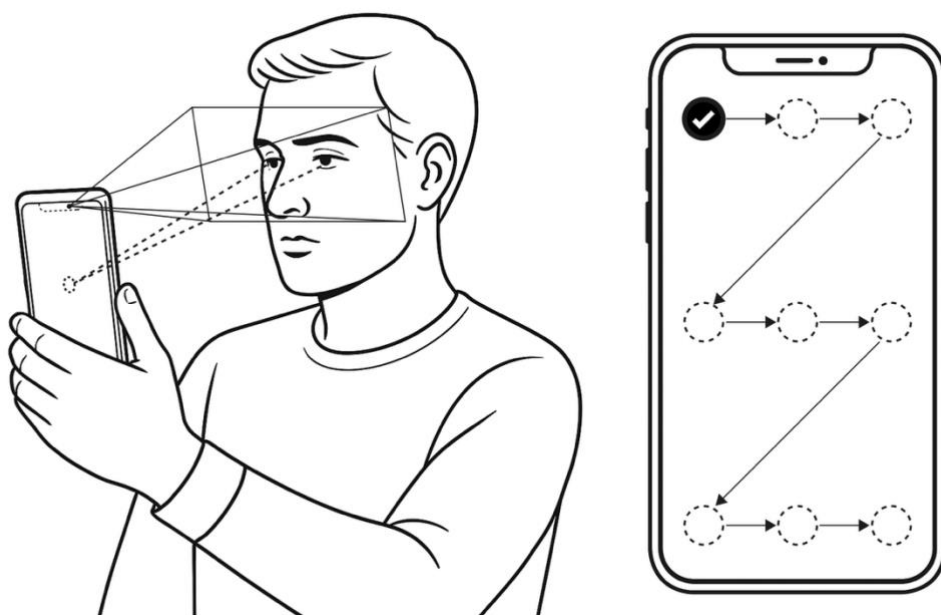


Рисунок 2.4 – Калібрування програмного забезпечення для відслідковування погляду за допомогою вбудованої камери телефону.

Етап 4. Збір та первинна обробка даних.

Для кожної АОІ обчислюються метрики, визначені в розділі 2.2. Ділянки запису з нестабільним сигналом або тривалими перервами виключаються як аномальні. Будуються теплові карти розподілу уваги та маршрути погляду з нумерованою послідовністю фіксацій. Результати нормалізуються між учасниками для коректного порівняння.

Підсумок: таблиці метрик по АОІ для кожного учасника; теплові карти та маршрути погляду для кожного екрана.

Етап 5. Інтерпретація результатів та ідентифікація проблемних зон.

Отримані метрики порівнюються між варіантами дизайну або підгрупами учасників. Об'єктивні показники погляду зіставляються із суб'єктивними оцінками для кожного екрану. Розбіжність між ними є сигналом проблеми, яку жоден з підходів окремо не фіксує. Проблемні зони інтерфейсу ідентифікуються та розподіляються за рівнем критичності виявлених відхилень.

Етап 6. Формування рекомендацій та верифікація змін.

На підставі виявлених проблем формуються рекомендації щодо розташування, розміру, кольорового акценту або ієрархії елементів. Після внесення змін проводиться повторна сесія айтрекінгу за тією самою процедурою, що дозволяє безпосередньо порівняти метрики до і після. Результати обох ітерацій документуються та формують базу знань для оптимізації дизайну в наступних версіях продукту.

Наведений алгоритм є відтворюваним у межах будь-якого айтрекінг-дослідження статичних мобільних інтерфейсів незалежно від конкретного програмного інструментарію.

2.7. Метод оцінювання ефективності дизайну динамічних мобільних екранів

Метод оцінювання статичних екранів, описаний у розділі 2.6, може бути застосований лише за умови, що положення зон інтересу залишається незмінним упродовж усієї сесії. Для динамічних екранів, типологію яких наведено в розділі 2.4, ця умова не виконується: прокручуваний контент, анімаційні переходи та відеоконтент змінюють просторове положення елементів у часі. Без синхронного запису стану інтерфейсу коректний розрахунок метрик для часових зон інтересу (T-AOI) неможливий.

Пропонований метод є розширенням методу для статичних екранів. Він зберігає шестистапну структуру та всі процедурні рішення, але вносить три доповнення там, де різниця між статичним і динамічним сценаріями є суттєвою.

Перше доповнення стосується синхронізації стану інтерфейсу. Для статичних екранів достатньо записати координати погляду з часовими мітками, але для динамічних потрібен другий паралельний потік даних, що реєструє стан інтерфейсу в кожен момент: позицію прокрутки, ідентифікатор поточного екрану або тайм-код відео. Обидва потоки повинні мати спільну часову шкалу.

Друге доповнення: інтервали анімаційних переходів виключаються з аналізу до розрахунку будь-яких метрик. Фіксація під час переходу між екранами не є аномальною в технічному сенсі, але семантично нерелевантна.

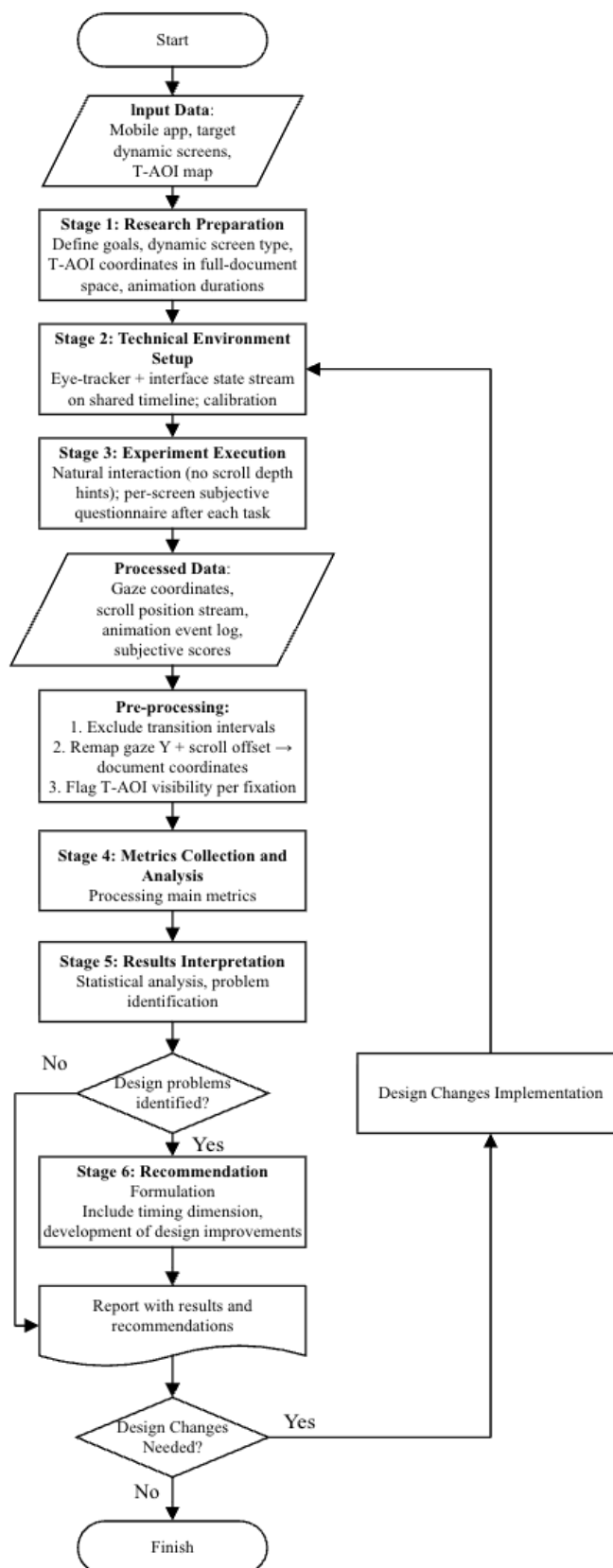


Рисунок 2.5 – Загальний алгоритм методу оцінювання дизайну динамічних мобільних інтерфейсів з використанням айтрекінгу

Третє доповнення стосується перерахунку координат. Для прокручуваних екранів координати погляду у системі відліку екрану перераховуються у координати повного документа: до Y-координати кожної фіксації додається поточна позиція прокрутки. Цей крок виконується перед будь-яким АОІ-аналізом.

Загальна схема методу наведена на рисунку 2.5.

Метод реалізується у шість послідовних етапів. Нижче на кожному етапі чітко позначено, що є спільним зі статичним методом, а що специфічне для динамічних екранів.

Етап 1. Підготовка дослідження. Визначення об'єкта, розмітка Т-АОІ та документування динаміки.

Виконується типологічна класифікація екрану за галузевим типом і за типом динамічної взаємодії. Для прокручуваних екранів Т-АОІ розмічаються у координатах повного документа: для кожної зони фіксуються верхня та нижня Y-координати, і обчислюється мінімальна глибина прокрутки, необхідна для її появи у видимому вікні. Для екранів з анімаційними переходами документуються тривалість і тип кожної анімації у конкретному інтерфейсі. Для відеоконтенту визначаються тайм-коди релевантних сегментів і Т-АОІ всередині них.

Підсумок: карта Т-АОІ із просторово-часовими параметрами для кожного елемента (координати, часові межі видимості).

Етап 2. Налаштування середовища та організація синхронізованого запису.

Виконується стандартна процедура підготовки середовища (як на етапі 2 методу для статичних екранів). Додатково підключається підсистема для реєстрації стану інтерфейсу. З єдиною часовою міткою фіксуються: позиція прокрутки, ідентифікатор поточного екрану, тайм-код відео та події анімаційних переходів.

Підсумок: підтверджена синхронізація часових міток айтрекера та потоку стану інтерфейсу, перевірена перед початком основної сесії.

Етап 3. Проведення сесії.

Сесія проводиться за стандартною процедурою, описаною в розділі 2.6. Для прокручуваних екранів сценарій завдання не містить вказівок щодо глибини

прокрутки: учасник взаємодіє природним чином. Для відеоконтенту кожен факт повторного запуску відео реєструється окремо.

Етап 4. Обробка даних.

До стандартних операцій попередньої обробки додаються три кроки, що виконуються в такій послідовності. Перший: фіксації в інтервалах анімаційних переходів отримують мітку виключення і не беруть участі в подальших розрахунках. Другий: для прокручуваних екранів до Y-координати кожної фіксації додається значення позиції прокрутки на той самий момент часу. Результатом є координати у системі відліку повного документа. Третій: для кожної фіксації встановлюється, чи знаходилась відповідна T-AOI у видимому вікні в цей момент. Лише після цих трьох кроків виконується стандартний розрахунок метрик.

Підсумок: таблиці метрик по T-AOI; теплові карти в координатах повного документа; маршрути погляду з виключеними інтервалами переходів.

Етап 5. Інтерпретація результатів.

Інтерпретація виконується за стандартною процедурою порівняння метрик погляду із суб'єктивними оцінками. Додатково для прокручуваних екранів аналізується розподіл глибини прокрутки SD : якщо медіана SD вибірки менша за мінімальну глибину, необхідну для появи цільової T-AOI у видимому вікні, проблема є системною і не залежить від якості дизайну самої зони.

Етап 6. Формування рекомендацій та верифікація змін.

Рекомендації для динамічних екранів включають часовий вимір, відсутній у рекомендаціях для статичних: момент появи критичного елемента у відео; висота першого розміщення ключового контенту відносно нижньої межі першого видимого вікна, оптимальна тривалість анімаційного переходу. Повторна сесія проводиться за тим самим протоколом, що й основна.

Синхронізація стану інтерфейсу з потоком координат погляду потребує програмної інтеграції між айтрекером і інтерфейсом, що тестується.

2.8. Багатокритеріальне колективне оцінювання та прийняття рішення про якість дизайну

Розроблені методи дають для кожної зони інтересу кілька метрик: час до першої фіксації, тривалість і частоту фіксацій, частку учасників без фіксації, а також суб'єктивну оцінку зручності. На етапі інтерпретації ці числа необхідно зводити до одного висновку про якість дизайну, і складність полягає в тому, що окремі метрики нерідко суперечать одна одній. Елемент швидко привертає погляд, проте його не помічає третина учасників; об'єктивні показники прийнятні, а суб'єктивна оцінка – низька. Без чіткого правила такий висновок залежить від суб'єктивного враження дослідника і погано відтворюється.

Нижче подано правило для прийняття рішення, яке використовується на етапі інтерпретації результатів експерименту. Спочатку критеріям призначають вагові коефіцієнти за їхньою важливістю, метрики переводять у спільну шкалу, після чого зважені значення згортають в один показник і зіставляють із пороговими рівнями.

2.8.1. Критерії оцінювання

За критерії взято метрики візуальної уваги, які найсильніше пов'язані з якістю дизайну. Кожен критерій співвіднесено з певною фазою моделі інформаційної взаємодії, завдяки чому набір охоплює весь хід взаємодії від першого погляду на елемент до враження від нього (Таблиця 2.1).

Помітність (K_1) визначає, наскільки швидко погляд натрапляє на елемент: чим менший час до першої фіксації, тим помітніший елемент. Легкість опрацювання (K_2) спирається на тривалість фіксації: занадто короткі фіксації свідчать про поверхневий перегляд, а занадто довгі – про труднощі сприйняття, тому найкращим є середній діапазон. Критерій охоплення аудиторії (K_3) показує, яка частка учасників узагалі помітила елемент; чим вона більша, то краще. Критерій цілеспрямованості сканування (K_4) відображає, яка частина фіксацій припала саме на зони інтересу, а не на сторонні ділянки екрану. Критерій суб'єктивної зручності (K_5) учасник оцінює самотійно за п'ятибальною

шкалою. За потреби набір критеріїв можна доповнити, при цьому процедура прийняття рішення не змінюється.

Таблиця 2.1 – Критерії оцінювання якості дизайну

Критерій	Метрика	Який результат кращий
K_1 , Помітність	Час до першої фіксації	Менше
K_2 , Легкість опрацювання	Тривалість фіксації	Середній діапазон
K_3 , Охоплення аудиторії	Частка людей, що мають фіксації в зоні інтересу	Більше
K_4 , Цілеспрямованість сканування	Зворотне до частоти перегляду несуттєвих зон	Більше
K_5 , Суб'єктивна зручність	Оцінка за шкалою 1-5	Менше

2.8.2. Визначення вагових коефіцієнтів

Критерії оцінювання не є рівнозначними, а їхня відносна важливість залежить від типу екрана та характеру завдання користувача. Для екранів із критичною інформацією (фінансових, медичних) визначальним є охоплення аудиторії, оскільки невиявлення ключового показника має найтяжчі наслідки; для навігаційних екранів пріоритетними є помітність цільового елемента та цілеспрямованість сканування. З огляду на це вагові коефіцієнти w_i не задаються як універсальні сталі, а визначаються експертним шляхом окремо для кожного типу екрана; сума цих коефіцієнтів дорівнює одиниці.

Для визначення ваг застосовано метод аналізу ієрархій [91], що ґрунтується на попарному порівнянні критеріїв. Експерти оцінюють відносну важливість кожної пари критеріїв за дев'ятибальною шкалою (1 – однакова важливість, 9 – абсолютна перевага одного критерію над іншим). Попарне порівняння забезпечує вищу узгодженість суджень порівняно з безпосереднім призначенням числових ваг, оскільки зводить завдання до елементарних порівнянь. Результати утворюють зворотно-симетричну матрицю парних порівнянь

$$A = [a_{ij}], \text{ для якої } a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ii} = 1 \quad (2.1)$$

Вектор вагових коефіцієнтів визначається нормуванням кожного стовпця матриці на його суму, з суму з подальшим усередненням рядків. Несуперечливість суджень контролюється відношенням узгодженості CR, прийнятним вважається значення $CR \leq 0,1$. Вагові коефіцієнти, визначені експертною групою окремо для кожного досліджуваного типу екранів.

2.8.3. Нормалізація показників

Метрики візуальної уваги вимірюються в різних одиницях (мілісекунди, частки, бали) і мають різний напрям бажаної зміни, тому їх безпосереднє підсумовування є некоректним. Кожен показник нормалізується, тобто приводиться до безрозмірної величини в межах від 0 до 1, де одиниця відповідає найкращому, а нуль – найгіршому стану дизайну. Після нормалізації критерії стають порівнянними між собою.

Для показників, зменшення яких відповідає підвищенню якості (час до першої фіксації, суб'єктивна оцінка), нормалізація виконується за формулою:

$$n_i = \max\left(0, 1 - \frac{x_i - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}}\right), \quad (2.2)$$

де $x_{i \min}$, $x_{i \max}$ – найкраще та найгірше очікувані значення показника для відповідного типу екрана. Значення, що виходять за межі діапазону, відсікаються до 0 або 1.

Для показників, збільшення яких відповідає підвищенню якості (охоплення аудиторії, цілеспрямованість сканування), застосовується пряма залежність:

$$n_i = \frac{x_i - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}}. \quad (2.3)$$

Показник тривалості фіксації нормалізується відносно оптимального значення, оскільки найкращим є середній діапазон, а відхилення в обидва боки знижують оцінку:

$$n_2 = \max\left(0, 1 - \frac{|T_{fd} - t_{fd}|}{\delta}\right), \quad (2.4)$$

де t_{fd} – оптимальна тривалість фіксації (200–350 мс), δ – допустиме відхилення (200 мс).

2.8.4. Узагальнений показник і прийняття рішення

Узагальнений показник якості зони інтересу обчислюється як зважена сума нормалізованих оцінок критеріїв:

$$Q_j = \sum_{i=1}^k w_i n_i, \quad (2.5)$$

де k – кількість критеріїв, j – номер зони інтересу. Оскільки сума вагових коефіцієнтів дорівнює одиниці, показник Q_j належить проміжку від нуля до одиниці. За наявності кількох зон інтересу їхні показники об'єднують з урахуванням пріоритету кожної зони p_j (сума всіх пріоритетів дорівнює одиниці), що дає комплексний показник якості дизайну екрана DQI (Design Quality Index):

$$DQI = \sum_{j=1}^m p_j Q_j, \quad (2.6)$$

де m – кількість зон інтересу. Прийняття рішення здійснюється шляхом зіставлення значення DQI з пороговими рівнями (таблиця 2.2): вищому значенню відповідає вища якість дизайну, а градації рівнів визначають характер подальших дій – прийняття екрана, доопрацювання окремих зон або повторне проєктування.

Таблиця 2.2 – Порогові рівні прийняття рішення

Значення DQI	Рівень якості	Характер подальших дій
0,80 - 1,00	ефективний дизайн	прийняття, за потреби незначні правки
0,60 - 0,80	задовільний дизайн	доопрацювання окремих проблемних зон
0,40 - 0,60	потребує покращення	перегляд візуальної ієрархії екрана
< 0,40	критичні проблеми	повторне проєктування та дослідження

2.9. Сегментація за групами користувачів

Вибірка у контексті айтрекінг-досліджень має включати достатню кількість учасників, які репрезентують цільову аудиторію мобільного додатку. Якщо дизайн додатку орієнтовано на широкий загаль, доцільно залучити учасників різного віку, гендеру, ступеня технічної обізнаності. Цей підхід дає змогу виявити ймовірні відмінності у сприйнятті та поведінці, а також зробити висновки, релевантні для різних груп користувачів. Водночас кількість учасників не повинна бути занадто малою, аби запобігти високому ризику статистичних похибок. Рекомендовано залучати не менше 15-20 осіб на кожен окрему групу (наприклад, молодь, дорослі, старші) [82, 93].

2.10. Висновки

У другому розділі розроблено модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження. Модель структурує процес взаємодії як послідовність чотирьох фаз із трьома паралельними інформаційними каналами – візуальним, когнітивним і суб'єктивним. Фаза сенсорної реєстрації завершується першою фіксацією в зоні інтересу, її показником є час до першої фіксації. Фаза візуального декодування відповідає активному опрацюванню елемента, її показником є тривалість фіксації. Фаза когнітивного інтерпретування не має прямого показника, однак її проблеми відображаються в повторних фіксаціях на тому самому елементі та в розходженні між об'єктивними

метриками й суб'єктивною оцінкою зручності. Фаза поведінкової реакції характеризується маршрутом погляду та частотою фіксацій поза AOI. Така формалізація дає змогу прив'язати отримані метрики до конкретної фази взаємодії, де відбулося відхилення від очікуваного перебігу, і формулювати дизайн-рекомендації, цілеспрямовані саме на ту частину процесу, яка має проблему. Модель також слугує теоретичним підґрунтям для побудови системи критеріїв оцінювання та обґрунтування їхніх вагових коефіцієнтів у процедурі розрахунку показнику якості дизайну DQI. Кожен із п'яти критеріїв якості співвіднесено з відповідною фазою взаємодії.

У розділі розроблено два методи оцінювання дизайну мобільних інтерфейсів на основі айтрекінгу. Перший метод оцінює статичні екрани, визначає систему метрик візуальної уваги (час до першої фіксації, тривалість і частота фіксацій, маршрут погляду, теплові карти, частота фіксацій поза AOI), класифікацію типів екранів мобільних додатків (фінанси, медицина, навігація, e-commerce, текст) та шестиетапний процес проведення дослідження. Від інших методів він відрізняється двома рішеннями: класифікація екрану і визначення AOI відбуваються до початку збору даних, а суб'єктивне оцінювання зручності виконується після взаємодії з кожним окремим стимулом. Другий метод оцінює динамічні екрани, це самостійне доповнення для сценаріїв з прокручуванням, навігаційними переходами, відеоконтентом та інтерактивними елементами. Для кожного з чотирьох типів динамічних екранів введено поняття T-AOI з прив'язкою до координат повного документа та тайм-кодів, визначено метрики охоплення і залученості, а алгоритм реалізації розширено трьома операціями попередньої обробки. Цей метод описано і теоретично обґрунтовано; його емпірична валідація є предметом подальших досліджень. Обидва методи спираються на єдину систему метрик і загальну шестиетапну структуру та можуть застосовуватись як окремо, так і спільно залежно від характеру досліджуваних екранів. Формалізовано правило прийняття рішення щодо якості дизайну, що зводить різномірні показники візуальної уваги до спільної шкали, зважає їх за визначеними експертною оцінкою коефіцієнтами та узагальнює

в комплексний показник якості дизайну DQI, який зіставляється з пороговими рівнями.

3. ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ EYESENSE ДЛЯ МОБІЛЬНОГО АЙТРЕКІНГУ

3.1. Вступ

Для практичної реалізації розробленого методу оцінювання статичних екранів необхідний програмний засіб, що забезпечує повний цикл айтрекінг-дослідження на мобільному пристрої: від калібрування та збору даних до візуалізації результатів. У даному розділі представлено проектування, реалізацію та алгоритмічне забезпечення мобільного додатку EyeSense.

3.2. Аналіз вимог та обґрунтування вибору технологій

На основі аналізу існуючих рішень та вимог розробленого методу сформульовано функціональні вимоги до програмного засобу:

1. Реєстрація точок погляду (gaze points) у реальному часі за допомогою фронтальної камери смартфона.
2. Виявлення фіксацій та сакад з потоку координат погляду.
3. Побудова теплових карт та маршрутів погляду.
4. Підтримка структурованих експериментів зі стимулами.
5. Збір суб'єктивних оцінок (анкетування).
6. Збереження та передача анонімізованих даних.
7. Кросплатформність (iOS, Android).
8. Робота без підключення до мережі під час дослідження.

Для реалізації обрано фреймворк Flutter (мова Dart), що забезпечує кросплатформну розробку з єдиною кодовою базою та високу продуктивність рендерингу. Для айтрекінгу обрано Eyedid SDK (розробник – VisualCamp, Південна Корея), який є розвитком платформи SeeSo [59] та забезпечує виявлення обличчя та очей, обчислення напрямку погляду та проєкцію у 2D-координати екрана з використанням лише фронтальної камери пристрою. Вибір SDK для айтрекінгу здійснювався за трьома критеріями, сформульованими на основі вимог дослідження: підтримка Flutter для кросплатформної розробки; задокументована точність $\leq 2^\circ$ кутового відхилення на відстані 30-40 см без інфрачервоного освітлення; дозвіл на академічне використання без передачі відеопотоку або

персональних та біометричних даних на сторонні сервери для дотримання вимог конфіденційності учасників.

GazeRecorder [50] та WebGazer.js [52] не пройшли перший критерій, оскільки обидва працюють виключно в браузерному середовищі та не мають підтримки Flutter. Eyedid SDK [59] відповідає всім трьом критеріям: має офіційний Flutter-пакет `eyedid_flutter`, задокументована точність складає $\sim 1^\circ$ при стандартних умовах освітлення, а умови академічної ліцензії не передбачають передачі даних учасників.

Нижче наведено повний стек технологій (Таблиця 3.1), використаних при розробці додатку EyeSense.

Таблиця 3.1 – Стек технологій додатку EyeSense

Компонент	Технологія / бібліотека
Фреймворк	Flutter (Dart SDK ^3.9.2)
SDK відстеження погляду	eyedid_flutter 1.0.0-beta4 (Eyedid / SeeSo)
Управління станом	flutter_riverpod 2.4.9
Маршрутизація	go_router 14.0.2
Локальне key-value сховище	shared_preferences 2.2.2
Локальна NoSQL база даних	hive 2.2.3 + hive_flutter
Хмарне сховище	firebase_core 2.24.2 + firebase_storage 11.6.0
Захоплення скріншотів	screenshot 3.0.0
Локалізація	flutter_localizations + intl 0.20.2 (ARB)
Анонімна ідентифікація	uuid 4.5.1
Android збірка	Kotlin + Gradle (Kotlin DSL .kts), Java 11
iOS збірка	Swift, CocoaPods (Eyedid доставляється як Pod)

3.3. Архітектура додатку

Архітектура додатку побудована за принципом feature-first layered architecture.

Код організовано за функціональними модулями, кожен з яких містить три шари:

- Domain – доменні моделі даних (Experiment, UserProfile, Question, GazeFixation);
- Data – репозиторії, відповідальні за читання та запис даних (Hive, SharedPreferences, Firebase);
- Presentation – UI-сторінки та Riverpod-провайдери.

Загальна структура каталогів наведена нижче (Рисунок 3.1).

```
lib/
├── main.dart                # Точка входу
├── app/router.dart          # Маршрутизатор (GoRouter)
├── core/
│   ├── services/           # Глобальні сервіси
│   ├── theme/              # Палітра та стилі
│   └── widgets/            # Перевикористовувані компоненти
└── features/
    ├── onboarding/         # Екран вітання
    ├── profile/            # Дані учасника
    ├── calibration/        # Калібрування очей
    ├── experiments/        # Проведення досліджень
    └── results/            # Візуалізація та завантаження
```

Рисунок 3.1 – Структура каталогів додатку EyeSense

Для управління реактивним станом та впровадження залежностей (Dependency Injection) використовується бібліотека Riverpod [94]. Наведено основні провайдери додатку (Таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Основні Riverpod-провайдери додатку EyeSense

Провайдер	Призначення
authServiceProvider / userIdProvider	Асинхронне створення та отримання анонімного UUID користувача
firebaseStorageProvider	Синхронний провайдер сервісу завантаження у хмару
imageGeneratorProvider	Провайдер сервісу генерації PNG-зображень
experimentsWithStatus-Provider	FutureProvider.family, що об'єднує список експериментів зі статусом їх завершеності з Hive та перераховується при зміні локалі
localeProvider	StateProvider поточної мови (en / uk)

Маршрутизатор побудований на бібліотеці GoRouter [95] і реалізує суворий лінійний потік з автоматичними переадресаціями (redirect guards):

- перший запуск: / → /profile → /calibration-instructions → /calibration → /experiments;
- повторний запуск без перекалібрування: / → /experiments;
- повторний запуск із перекалібруванням: / → /calibration-instructions → /calibration → /experiments;
- проведення дослідження: /experiments → /experiment-detail/:id → /experiment-presentation/:id → /questionnaire/:id → /results/:id.

Захисна логіка у функції `_redirect()` перевіряє: чи пройдено онбординг (`isOnboardingDone`); чи виконано калібрування (`isCalibrationDone`); чи потрібне примусове перекалібрування (`getRequiredFlow()`).

При старті `main()` виконується послідовна ініціалізація:

- 1) ініціалізація Firebase (`Firebase.initializeApp()`);
- 2) ініціалізація Hive та відкриття боксу `experiment_results`;
- 3) завантаження `ProfileRepository` з `SharedPreferences`; лічильник запусків збільшується на 1;

- 4) отримання або генерація анонімного UUID (AuthService);
- 5) переведення UI у повноекранний режим (SystemUiMode.immersiveSticky);
- 6) Ініціалізація AppRouter з урахуванням поточного стану онбордингу та калібрування.

3.4. Взаємодія з апаратною складовою

EyeSense покладається виключно на вбудовану фронтальну камеру смартфона. Зовнішні пристрої не використовуються. Всю роботу з апаратним рівнем виконує SDK Eyedid [59]. Eyedid отримує потік кадрів із фронтальної камери, виконує виявлення обличчя та очей, обчислює напрямок погляду та створює його проекцію у двовимірні координати екрана (x, y).

Доступ до камери реалізується через сервіс GazeTrackerService – singleton-обгортку над Eyedid SDK, яка гарантує, що лише один екземпляр камери активний у будь-який момент часу.

Роздільна здатність Full HD 1920×1080 обрана для забезпечення достатньої якості зображення для точного виявлення очей. Фільтр погляду (setUseGazeFilter) зменшує дрижання (jitter) в сирих даних погляду. Виявлення моргання та стану користувача вимкнені, оскільки вони не потрібні для поточного сценарію і лише збільшували б обчислювальне навантаження.

На платформі iOS у файлі Info.plist зареєстровано NSCameraUsageDescription з поясненням щодо використання камери для відстеження погляду. На платформі Android SDK запитує дозвіл android.permission.CAMERA під час виконання; без нього ініціалізація трекера завершиться невдачею.

Оскільки Eyedid SDK повертає координати погляду у пікселях відносно фізичного розміру екрана, важливо, щоб системні панелі не займали частину робочої області. Тому при старті додатку системний UI приховується за допомогою режиму immersiveSticky. Це забезпечує відповідність між координатами погляду від SDK і пікселями відображуваного контенту.

Наведено основні методи управління життєвим циклом трекера погляду (Таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Методи управління життєвим циклом трекера

Метод	Коли викликається
initialize()	Початок сеансу калібрування або дослідження
startTracking()	Після успішного калібрування; початок запису даних
stopTracking()	Завершення дослідження або переривання
release()	Вихід зі сторінки, де використовується трекер
forceRelease()	Примусове очищення, наприклад при завершенні додатку

3.5. Алгоритми обробки даних погляду

3.5.1. Зважене згладжування (ЕМА-буфер)

Сирі дані від SDK надходять з високою частотою та містять природний шум. Для отримання стабільних координат застосовується зважене ковзне середнє з експоненційними вагами. Буфер зберігає останні $B = 10$ точок погляду. Для кожної точки обчислюється вага:

$$w_i = \alpha^i, i = 0, 1, \dots, B - 1, \quad (3.1)$$

де $\alpha = 1,8$, i – індекс точки у буфері (0 – найстаріша).

Згладжені координати обчислюються як зважене середнє:

$$x_{smooth} = \frac{\sum_{i=0}^{B-1} (x_i \times w_i)}{\sum_{i=0}^{B-1} w_i}, y_{smooth} = \frac{\sum_{i=0}^{B-1} (y_i \times w_i)}{\sum_{i=0}^{B-1} w_i}, \quad (3.2)$$

Ваги зростають експоненційно, тому найновіші записи мають більший вплив, що забезпечує швидку реакцію на рухи очей при збереженні згладженості траєкторії. Розмір буфера $B = 10$ обрано як компроміс між згладженістю та

чутливістю до змін. Значення $\alpha = 1,8$ забезпечує швидке затухання вагів старих точок: вага найстарішої точки відносно найновішої становить лише $1/1,8^9 \approx 0,003$.

3.5.2. Дискретизація даних погляду

Замість зберігання кожного callback-повідомлення додаток здійснює дискретизацію з інтервалом $\Delta t = 150$ мс. Це забезпечує ефективну частоту приблизно 6-7 Гц, достатню для аналізу фіксацій та побудови теплових карт. Вибір інтервалу обумовлений компромісом між точністю (менший інтервал) та продуктивністю та об'ємом даних (більший інтервал).

3.5.3. Алгоритм виявлення фіксацій (I-DT)

Реалізовано адаптований варіант алгоритму I-DT (Identification by Dispersion Threshold), описаного у [73]. Алгоритм ітерує послідовність точок погляду та формує кластери:

- 1) Для кожної точки перевіряється, чи знаходиться вона у межах порогу розсіювання $D = 40$ пікселів від центроїда поточного кластера;
- 2) Якщо так – точка додається до кластера; якщо ні – кластер закривається і відкривається новий;
- 3) Кластер визнається фіксацією, якщо містить щонайменше $N_{\min} = 2$ точки та має тривалість понад $T_{\min} = 100$ мс;
- 4) Для кожної фіксації обчислюються: центроїд (середнє x, y), тривалість та час початку відносно старту дослідження.

Поріг розсіювання $D = 40$ пікселів обрано з урахуванням типових розмірів елементів мобільного інтерфейсу та точності мобільного айтрекінгу (середня похибка 1-2 см для систем на основі фронтальної камери [47]). Мінімальна тривалість $T_{\min} = 100$ мс узгоджується з нижньою межею тривалості фіксацій, наведених в рекомендаціях [85].

3.5.4. Побудова теплової карти (Gaussian KDE)

Теплова карта будується методом ядерного оцінювання густини (Kernel Density Estimation) з ядром Гауса:

$$K(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \times e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.3)$$

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^N K(x - x_k, y - y_k), \quad (3.4)$$

де N – кількість точок погляду, (x_k, y_k) – координати k -ї точки, $\sigma = 30$ пікселів – параметр ядра, що визначає ступінь розмиття. Алгоритм побудови теплової карти включає наступні кроки:

- 1) ініціалізується двовимірний масив *float* розміром з екран;
- 2) для кожної точки погляду з радіусом $r = 60$ px застосовується ядро Гауса з $\sigma = 30$;
- 3) масив нормалізується відносно максимального значення;
- 4) пікселі з інтенсивністю понад 2% відображаються через п'ятиколірний градієнт: синій \rightarrow блакитний \rightarrow зелений \rightarrow жовтий \rightarrow червоний;
- 5) зображення накладається на стимул з прозорістю та розмиттям;
- 6) крок сітки при рендерингу становить 2×2 пікселі для балансу між якістю та продуктивністю.

3.5.5. Побудова маршруту погляду

Маршрут погляду (gaze plot) відображає послідовність та тривалість фіксацій у вигляді пронумерованих кіл, з'єднаних лініями сакад. Радіус кола пропорційний тривалості фіксації:

$$r = \min(10 + d \times 18, 35), \quad (3.5)$$

де d – тривалість фіксації у секундах. Кола нумеруються у хронологічному порядку. Лінії між колами показують шлях між фіксаціями. Для маршруту погляду і теплової карти використовується одна й та сама логіка виявлення фіксацій.

3.6. Процес калібрування

Калібрування вирівнює відображення SDK з реальними координатами екрана конкретного пристрою та конкретного користувача.

Процес SDK-калібрування включає наступні етапи:

- 1) SDK через зворотний виклик `onCalibrationNextXY(x,y)` передає координати наступної точки;
- 2) додаток відображає червону крапку у заданій позиції, на яку дивиться учасник;
- 3) через 500 мс викликається `startCollectSamples()`;
- 4) `onCalibrationProgress(progress)` оновлює круговий індикатор прогресу;
- 5) `onCalibrationFinished(calibrationData)` повертає математичну модель корекції погляду;
- 6) дані зберігаються у `SharedPreferences` та відновлюються через `setCalibrationData()` при наступному запуску.

`CalibrationRepository.getRequiredFlow()` перевіряє, чи був додаток запущений після останнього калібрування. Якщо `currentLaunchCount > lastCalibrationLaunchId`, запускається сценарій перекалібрування. Це дозволяє компенсувати дрейф моделі при зміні положення пристрою або дистанції до екрана.

3.7. Збереження та передача даних

Збереження та передача даних реалізовані з урахуванням рекомендацій щодо конфіденційності [76]. Усі обчислення виконуються локально на пристрої. Дані передаються у хмарне сховище в анонімізованому вигляді (UUID, вік, стать без імені учасника).

Для зберігання налаштувань та стану додатку використовується `SharedPreferences`. Далі наведено структуру ключів (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Структура SharedPreferences додатку EyeSense

Ключ	Тип	Призначення
onboarding_done	bool	Чи завершено онбординг
calibration_done	bool	Чи є хоча б одне завершене калібрування
user_profile	JSON string	Профіль учасника (ім'я, стать, вік)
sdk_calibration_data	String	Дані калібрування Eyedid через кому
app_launch_count	int	Лічильник запусків додатку
last_calibration_launch_id	int	Номер запуску при останньому калібруванні
user_id	String	Анонімний UUID учасника

Бокс `experiment_results` зберігає записи `ExperimentResult`, де ключем виступає `experimentId` (наприклад, "1", "2", "3"). Кожен запис містить повний список `gazeData`, відповіді на анкету (`answers`) та мітку часу завершення (`completedAt`).

Після завершення дослідження дослідник може завантажити результати до `Firebase Cloud Storage`. Шлях у сховищі формується автоматично за структурою:

`users/{userId}_{datetime}_years_{age}_{gender}/exp{experimentId}/`

Кожна директорія експерименту містить файли: `heatmap_{date}.png`, `gazeplot_{date}.png`, `answers_{date}.json`, `fixations_{date}.json`.

Процес завантаження виконується у такій послідовності:

- 1) додаток програмно перемикає вкладки результатів;
- 2) для кожної вкладки пакет `screenshot` захоплює `RepaintBoundary` у вигляді `Uint8List`;
- 3) файли послідовно завантажуються до `Firebase Storage` через `FirebaseStorageService.uploadExperimentResult()`.

Завантаження є одностороннім (`write-only`): додаток не читає дані назад з хмари. Мережева взаємодія обмежена виключно `Firebase Storage` – зовнішні REST API, аутентифікація користувачів чи `real-time` база даних не використовуються.

Дані залишаються анонімними: у хмару передаються UUID, вік і стать, але не ім'я учасника.

Для проведення досліджень з різними учасниками на одному пристрої реалізовано функцію повного скидання `DataResetService.clearAllDataAndCreateNewUser()`. При скиданні:

- 1) очищаються всі записи у `SharedPreferences`: профіль, стан онбордингу, дані калібрування, UUID;
- 2) очищається бокс `Hive` з результатами експериментів;
- 3) лічильник запусків `app_launch_count` зберігається для підтримки логіки перекалібрування;
- 4) додаток повертається до початкового екрана та готовий до нової сесії.

3.8. Висновки

У третьому розділі представлено проєктування та реалізацію програмного засобу `EyeSense` для проведення мобільних айтрекінг досліджень. Сформульовано функціональні вимоги та обґрунтовано вибір технологій (`Flutter`, `Eyedid SDK`). Описано архітектуру додатку (`feature-first layered architecture` з управлінням станом через `Riverpod`). Розроблений програмний засіб `EyeSense` реалізує запропонований метод у вигляді кросплатформного мобільного додатка. Ключовим технічним результатом є дворівневий конвеєр обробки сигналу погляду: ЕМА-буфер усуває шум зі збереженням часової чутливості, а адаптований I-DT перетворює потік координат у послідовність фіксацій, придатних для АОІ-аналізу. Обрані параметри узгоджуються з рекомендаціями щодо мінімальної тривалості фіксацій.

Анонімізований формат даних (ID + вік + стать без ПІБ) та `write-only` архітектура хмарного завантаження забезпечили відповідність вимогам платформи `Prolific` щодо конфіденційності, що дозволило провести збір даних у запланованому обсязі.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ВІЗУАЛЬНОЇ УВАГИ

4.1. Вступ

Для валідації розробленого методу (Розділ 2) та програмного засобу (Розділ 3) проведено експериментальне дослідження розподілу візуальної уваги на типових екранах мобільних додатків. Дослідження спрямоване на: перевірку працездатності запропонованого методу та EyeSense; вивчення впливу віку та цифрової компетентності на розподіл уваги; виявлення відмінностей між об'єктивними метриками та суб'єктивними оцінками; формулювання практичних дизайн-рекомендацій.

4.2. Методика експерименту

Згідно з [36], очікувалося, що користувачі старшого віку демонструватимуть довший час до першої фіксації T_{ff} у критичних зонах інтересу (AOI), а також довші фіксації в межах AOI порівняно з молодшими користувачами. Водночас згідно з [38], очікувалося, що вища цифрова компетентність частково компенсуватиме віковий ефект, зменшуючи T_{ff} та час виконання завдання. Найгірші показники прогнозувалися для групи “старший вік + низька цифрова компетентність”, а найкращі – для групи “молодший вік + висока цифрова компетентність”.

Для оцінювання впливу віку та цифрової компетентності дослідження фокусується на показниках візуальної уваги та суб'єктивної зручності відповідно до рекомендацій [29]. Візуальна увага оцінювалася за двома метриками: часом до першої фіксації на критичних AOI (T_{ff}) та сумарним часом перебування погляду в цих зонах. Суб'єктивна зручність вимірювалася після кожного екрану за допомогою двох запитань про легкість виконання завдання: за шкалою від 1 до 5, де 1 означає «дуже легко», 5 – «дуже важко». Експеримент використовував два незалежні фактори: вік (молодша та старша групи, межа 40 років за медіаною вибірки) та цифрова компетентність. Для оцінювання цифрової компетентності використано короткий опитувальник із 5 запитань, кожне з яких оцінювалося за шкалою 1-5. Індекс цифрової компетентності (SL) розраховувався як нормована

сума відповідей:

$$SL = \frac{\sum_{i=1}^5 q_i}{25}, \quad (4.1)$$

де q_i – відповідь на i -те запитання (1 = дуже важко, 5 = дуже легко). $SL = 1,0$ відповідає максимальному рівню; поріг $SL \geq 0,9$ використовується для ідентифікації респондентів з високою цифровою компетентністю.

4.2.1. Характеристика вибірки

У дослідженні взяли участь 55 учасників, віком від 20 до 60 років (середній вік 37,2 року, медіана 35 років): 31 молодших (< 40 років) та 24 старших (≥ 40 років). За порогом цифрової компетентності $SL \geq 0,9$ вибірка розподілилася на 33 учасники (60%) з високою та 22 (40%) з низькою компетентністю (Таблиця 4.1). Для рекрутингу учасників була використана платформа Prolific [96], що дозволила залучити респондентів різних національностей, віку та рівня цифрового досвіду. Це підвищує різноманітність вибірки та покращує узагальнюваність отриманих результатів на ширшу аудиторію.

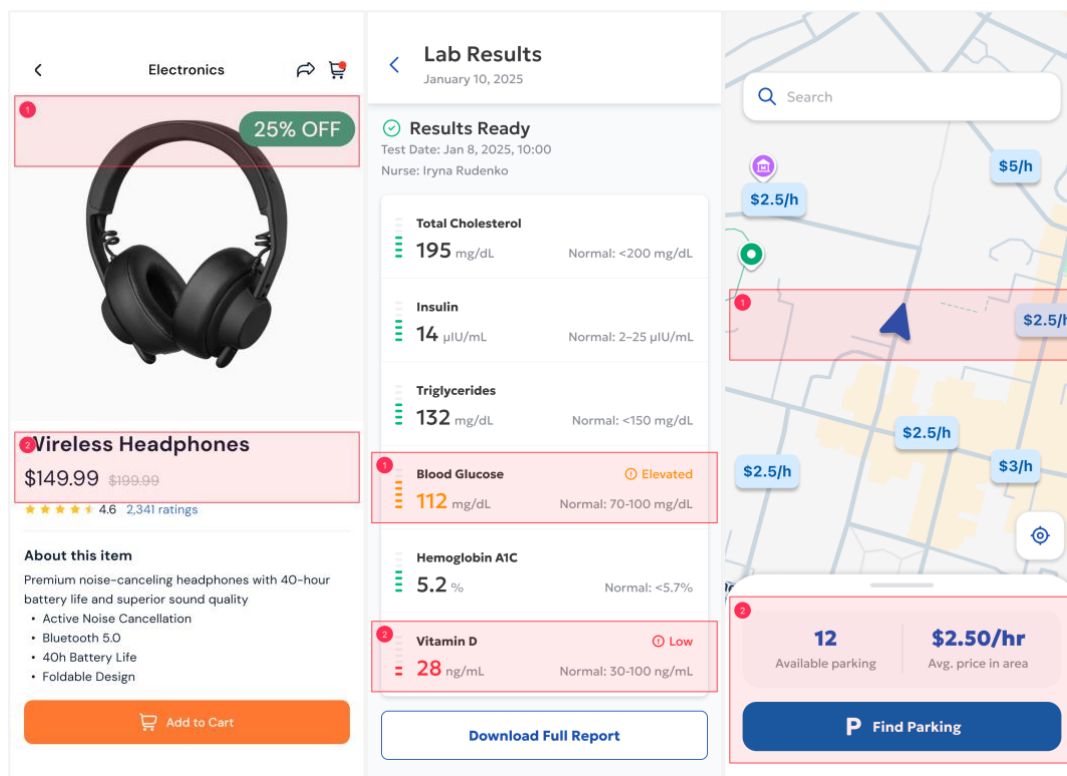
Таблиця 4.1 – Демографічні характеристики вибірки

Характеристика	Значення
Загальна кількість учасників	55
Вік	20-60 років
Молодша група (< 40 років)	31 (56,4%)
Старша група (≥ 40 років)	24 (43,6%)
Висока цифрова компетентність ($SL \geq 0,9$)	33 (60,0%)
Низька цифрова компетентність ($SL < 0,9$)	22 (40,0%)
Платформа рекрутингу	Prolific

4.2.2. Матеріали та обладнання

Дослідження проводилося за допомогою розробленого програмного засобу EyeSense (Розділ 3) на смартфонах учасників. Стимулами слугували три типових екрани мобільних додатків:

- Екран 1 (Рисунок 4.1а): картка товару. Завдання: знайти ціну та акційну пропозицію. АОІ: 1 – акційна пропозиція; 2 – ціна та назва товару.
- Екран 2 (Рисунок 4.1б): медичні результати. Завдання: визначити, чи є відхилення у показниках. АОІ: індикатори відхилення.
- Екран 3 (Рисунок 4.1в): карта з кнопкою дії. Завдання: знайти, як вмикається функція пошуку паркінгу. АОІ: кнопка “Паркування”.



а

б

в

Рисунок 4.1 – Екрани мобільних додатків, що були використані в експериментах: а – картка товару, б – медичні результати, в – карта з кнопкою дії

4.2.3. Процедура проведення

Процедура експерименту містила наступні етапи:

Етап 1: Підготовка. Інформована згода на участь в експерименті. Демографічний опитувальник, а також опитувальник цифрової компетентності для класифікації за досвідом.

Етап 2: Калібрування. 5-точкове калібрування на екрані смартфона.

Етап 3: Основні завдання. Інструкція перед кожним завданням. Учасник тримає смартфон природно на відстані 30-40 см. Запис погляду.

Етап 4: Суб'єктивна оцінка. Після кожного екрану учасники відповідали на 2 питання щодо виконаного завдання, оцінюючи легкість кожної дії за шкалою від 1 до 5, де 1 – дуже легко, 5 – дуже важко.

Етап 5: Завершення. Демонстрація результатів відстеження погляду, завантаження результатів в хмарне сховище. Перехід до наступного завдання.

Під час експерименту приватність респондентів була забезпечена наступними кроками:

- Відеопотік з камери оброблявся на смартфоні, відео не зберігалось. Були збережені лише координати погляду, теплові карти та маршрути погляду.
- Зберігалися лише дані, необхідні для дослідження. Ніякої чутливої або персональної інформації не збиралося. Кожному учаснику присвоювався ID без зв'язку з особистими даними.
- Учасники були детально проінформовані про те, які дані збираються, як обробляються, для чого використовуються.

Після завершення експерименту виконано поетапний аналіз зібраних даних. Спочатку результати впорядковано та відсортовано, після чого для кожного учасника розраховано індекс цифрової компетентності (SL), який використовувався для подальшої класифікації за рівнем цифрового досвіду. Далі з набору даних вилучено неуспішні спроби та записи з пропусками, що могли спотворювати підсумкові оцінки. На основі масиву фіксацій для кожного екрана та визначених зон інтересу (AOI) обчислено ключові метрики візуальної уваги,

зокрема час до першої фіксації (T_{ff}) у межах відповідної АОІ та тривалість фіксацій у цих зонах, що дозволило перейти до порівняльного аналізу між екранами та групами учасників.

4.3. Результати

Таблиця 4.2 містить ключові показники для кожної АОІ: охоплення (кількість та відсоток учасників, погляд яких зафіксувався в зоні інтересу), медіанний час до першої фіксації T_{ff} та медіанний час перебування погляду в зоні, а також кількість учасників, для яких ця АОІ стала першою зафіксованою.

Таблиці 4.3 і 4.4 порівнюють медіанні значення часу до першої фіксації (T_{ff}) та часу фіксацій в АОІ між підгрупами. Δ – різниця (старша або нижча SL мінус молодша або вища SL): позитивне значення означає, що ця підгрупа затримується довше. Таблиця 4.5 узагальнює суб'єктивні оцінки зручності по кожному питанню в розрізі груп (шкала 1-5; 1 = «дуже легко», 5 = «дуже важко»).

Таблиця 4.2 – Зведені метрики зонального аналізу по АОІ

Екран/АОІ	Досягли	Досягли %	Медіанна T_{ff} (мс)	Медіанний час фіксацій (мс)	Перша фіксація (n)
E1 АОІ 1 Акція	29/55	52,7%	3 666	708	16
E1 АОІ 2 Ціна і назва	33/55	60,0%	1 672	1 140	27
E2 АОІ 1 Глюкоза	35/55	63,6%	3 718	1 204	31
E2 АОІ 2 Вітамін D	25/55	45,5%	6 563	764	10
E3 АОІ 1 Курсор мапи	30/55	54,5%	3 500	603	24
E3 АОІ 2 Інфо- панель	29/55	52,7%	3 178	989	19

Таблиця 4.3 – Час до першої фіксації T_{ff} у підгрупах (медіана, мс)

Екран/АОІ	Молоді, <40	Старші, ≥ 40	Δ вік	Високий $SL \geq 0,9$	Низький $SL < 0,9$	Δ SL
E1 АОІ 1 Акція	3 520	6 067	+2 547	3 035	6 035	+3 000
E1 АОІ 2 Ціна і назва	1 732	1 657	-76	1 732	1 657	-76
E2 АОІ 1 Глюкоза	3 557	4 393	+836	3 754	3 304	-450
E2 АОІ 2 Вітамін D	7 330	5 355	-1 975	6 461	7 170	+710
E3 АОІ 1 Курсор мапи	4 149	2 030	-2 119	4 652	1 206	-3 446
E3 АОІ 2 Інфо- панель	2 864	4 754	+1 890	3 614	3 141	-473

Таблиця 4.4 – Час фіксацій в АОІ у підгрупах (медіана, мс)

Екран/АОІ	Молоді, <40	Старші, ≥ 40	Δ вік	Високий $SL \geq 0,9$	Низький $SL < 0,9$	Δ SL
E1 АОІ 1 Акція	853	506	-348	853	643	-210
E1 АОІ 2 Ціна і назва	1 108	1 140	+32	731	1 349	+618
E2 АОІ 1 Глюкоза	1 025	1 588	+564	1 031	2 219	+1 188
E2 АОІ 2 Вітамін D	617	844	+227	487	1 018	+530
E3 АОІ 1 Курсор мапи	572	634	+62	603	600	-3
E3 АОІ 2 Інфо- панель	2 424	833	-1 591	1 016	848	-168

Таблиця 4.5 – Суб’єктивні оцінки зручності (середнє; шкала 1-5)

Запитання	Всього	Молоді, <40	Старші, ≥40	Δ вік	Високий SL≥0,9	Низький SL<0,9	Δ SL
Наскільки легко було знайти ціну?	1,46	1,30	1,68	+0,38	1,41	1,55	+0,14
Як швидко ви помітили знижку?	2,08	1,83	2,41	+0,58	1,94	2,30	+0,36
Чи легко було визначити відхилення у показниках?	1,77	1,81	1,71	-0,09	1,66	1,95	+0,29
Чи була зрозуміла серйозність відхилень?	1,71	1,74	1,67	-0,08	1,69	1,75	+0,06
Як швидко ви знайшли кнопку пошуку паркування?	2,29	2,19	2,43	+0,24	2,18	2,47	+0,29
Чи було зрозуміло ваше поточне місцезнаходження на карті?	1,77	1,71	1,86	+0,15	1,73	1,84	+0,11

У першому експерименті (Рисунок 4.2), зона ціни та назви товару (АОІ 2) привернула погляд більшої частини учасників (60,0%), ніж зона акційної пропозиції (АОІ 1, 52,7%), і фіксувалася першою майже вдвічі частіше (27 учасників проти 16). Такий розподіл відповідає F-подібній моделі перегляду екрана, при якій великий текстовий блок ціни є природним «якорем» уваги.

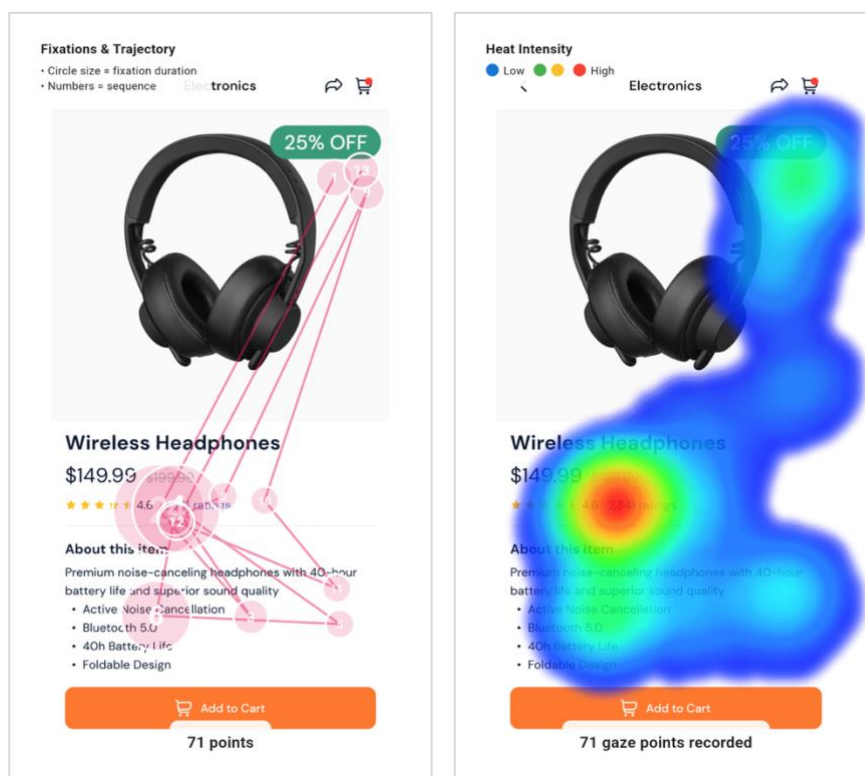
*a**б*

Рисунок 4.2 – Візуалізація першого айтрекінг експерименту:

a – маршрут погляду, *б* – теплова карта

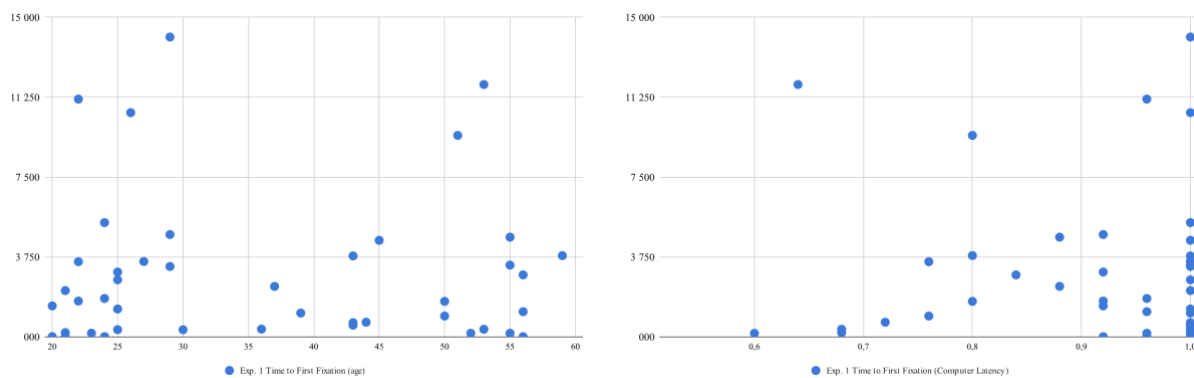
*a**б*

Рисунок 4.3 – Розподілення часу до першої фіксації для першого експерименту:

a – за віком, *б* – за цифровою компетентністю

На рисунку 4.3 зображено розподілення часу T_{ff} до першої фіксації у будь-якій

зоні АОІ для першого експерименту залежно від віку і цифрової компетентності. Медіана T_{ff} зони ціни склала 1 672 мс, тоді як зона акційної пропозиції досягалася у середньому за 3 666 мс. Суб'єктивно пошук ціни виявився простим для переважної більшості: 84% оцінили його як легкий або дуже легкий. Пошук акційної пропозиції назвали легким лише 67% учасників. Це свідчить про те, що значок знижки є менш очевидним для значної частини аудиторії. Старші учасники систематично гірше оцінювали обидва елементи: і пошук ціни, і помітність знижки. При цьому цифрова компетентність теж впливала на оцінку знижки: учасники з нижчою цифровою компетентністю давали їй гірші оцінки. Водночас жодних значущих відмінностей між групами з різною цифровою компетентністю в об'єктивних айтрекінг-даних не виявлено. В цьому експерименті різниця між групами проявляється у тому, наскільки зручним здався інтерфейс, але не в тому, як саме очі переміщувалися екраном.

У другому експерименті (Рисунок 4.4) на екрані медичних результатів показник рівня глюкози (АОІ 1) був зафіксований першим у 31 із 41 учасника, які мали фіксації принаймні в одній із зон інтересу. Низький показник вітаміну D (АОІ 2) привернув перший погляд лише у 10 учасників.

*a**б*

Рисунок 4.4 – Візуалізація другого айтрекінг експерименту:

a – маршрут погляду, *б* – теплова карта

На рисунку 4.5 зображено розподілення часу T_{ff} до першої фіксації у будь-якій зоні АОІ для другого експерименту залежно від віку і цифрової компетентності. Час до першої фіксації в АОІ 1 був майже вдвічі меншим: медіана T_{ff} становила 3 718 мс порівняно з 6 563 мс для АОІ 2. Таким чином, пріоритет розміщення (показник глюкози, розташований вище на екрані) виявився сильнішим за фактор змістової важливості: учасники систематично звертали увагу на глюкозу незалежно від групи, попри те, що відхилення вітаміну D могло бути не менш значущим. Загалом цей екран виявився найзрозумілішим для респондентів: 84% учасників повідомили, що легко або дуже легко знаходили аномальні показники, а 82% легко інтерпретували ступінь їхньої серйозності. Учасники з вищою цифровою компетентністю надавали вищі оцінки за двома пунктами. Водночас вік не мав статистично значущого впливу на об'єктивні метрики погляду, хоча у суб'єктивних оцінках спостерігалася слабка тенденція до гіршого сприйняття інтерфейсу в

старшій групі.

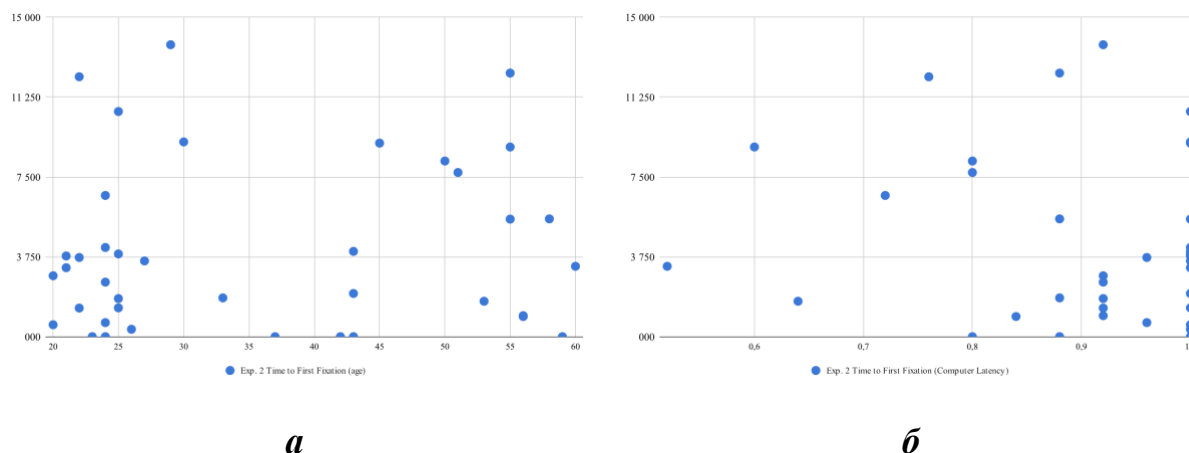


Рисунок 4.5 – Розподілення часу до першої фіксації для другого експерименту

а – за віком, б – за цифровою компетентністю

На навігаційному екрані (Рисунок 4.6) зафіксували свій погляд на курсорі на мапі лише 54,5% учасників, а на інформаційній панелі – 52,7%; перший погляд розподілився між ними майже порівну (24 проти 19). Проте тривалість перебування в зонах суттєво відрізнялася: учасники дивилися на інформаційну панель значно довше, ніж на курсор (медіана 989 мс проти 603 мс). Числові дані на інформаційній панелі вимагали свідомого опрацювання, тоді як курсор сприймався швидше.

Також був виявлений зв'язок між поведінкою погляду і точністю відповіді. Учасники, яким було зрозуміло поточне місцезнаходження на мапі, провели в зоні курсора майже вдвічі більше часу, ніж ті, кому було важко визначити місцезнаходження (714 мс проти 336 мс).

На рисунку 4.7 зображено розподілення часу T_{ff} до першої фіксації у будь-якій зоні АОІ для першого експерименту залежно від віку і цифрової компетентності. Між групами за рівнем цифрової компетентності виявлено принципово різні стратегії. Учасники з низькою цифровою компетентністю звертали увагу на курсор мапи значно раніше – медіана T_{ff} склала 1206 мс, тоді як у групи з високою цифровою компетентністю медіана T_{ff} – 4652 мс.

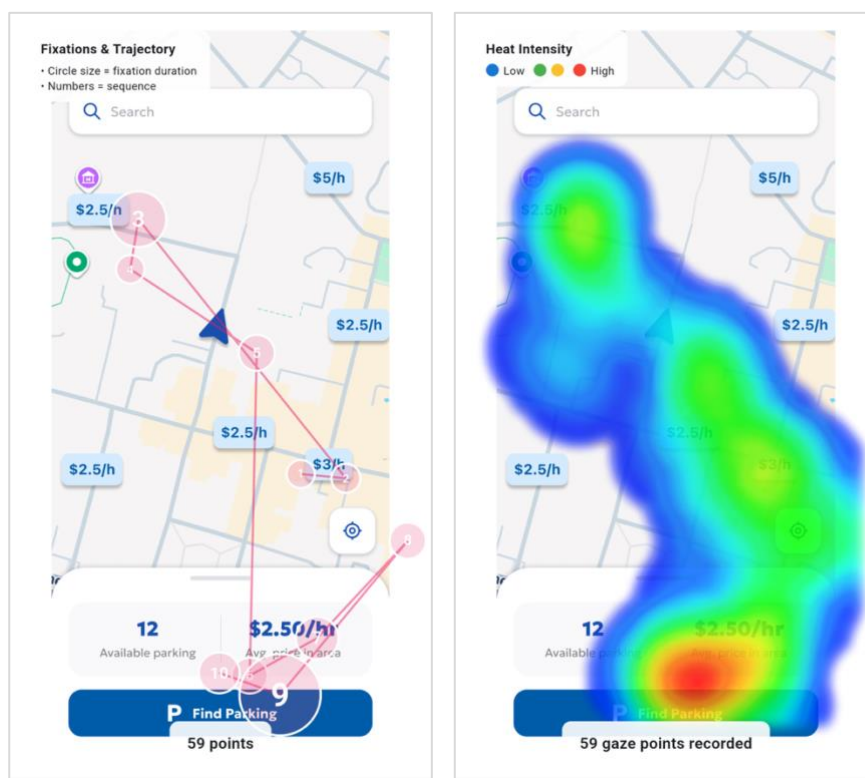
*a**б*

Рисунок 4.6 – Візуалізація третього айтрекінг експерименту:

a – маршрут погляду, *б* – теплова карта

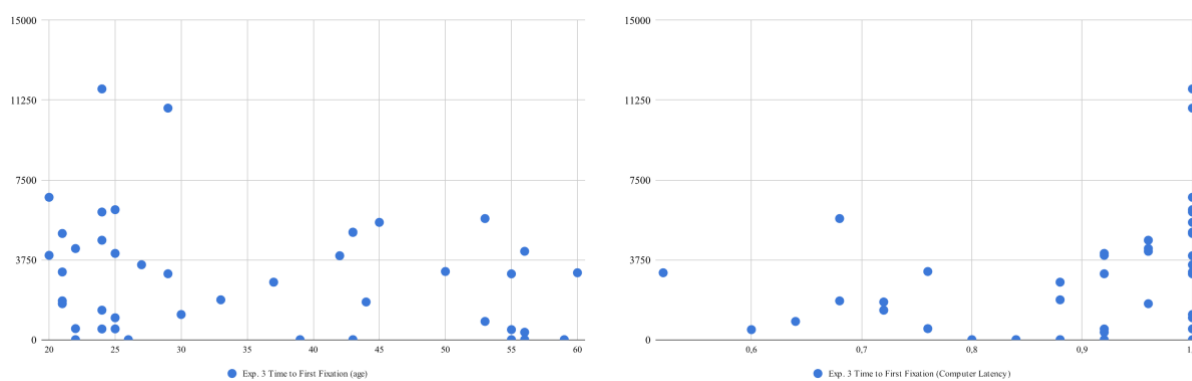
*a**б*

Рисунок 4.7 – Розподілення часу до першої фіксації для третього експерименту

a – за віком, *б* – за цифровою компетентністю

Досвідчені користувачі діяли інакше: спочатку уважно читали числові дані на інформаційній панелі, а вже потім зверталися до курсору. Перший погляд на курсор без попереднього зчитування контексту виявився недостатнім для правильного розуміння мапи.

4.3.1. Загальні патерни розподілу уваги

Отримані результати в цілому підтвердили окремі гіпотези дослідження, водночас виявивши ряд закономірностей, які уточнюють наше розуміння того, як вік і цифрова компетентність впливають на взаємодію з мобільними інтерфейсами.

Найстійкішою закономірністю у всіх трьох експериментах виявилася залежність порядку фіксацій від вертикального позиціонування елементів незалежно від вікової групи чи рівня цифрової компетентності учасника. На екрані медичних результатів показник глюкози (AOI 1), розташований вище, послідовно привертав перший погляд значно раніше за показник вітаміну D (AOI 2) у 31 із 41 учасника, що мали хоча б одну фіксацію в AOI (медіана T_{ff} 3557 мс проти 6461 мс). Аналогічно, на картці товару велика зона ціни (AOI 2) фіксувалася першою у 27 учасників проти 16 учасників у акційної пропозиції (AOI 1).

Ці дані узгоджуються з F-подібною моделлю перегляду, що описана в [97], згідно з якою верхня чверть екрану отримує найбільше первинних фіксацій. Однак отримані дані уточнюють цю концепцію для контексту мобільних додатків: провідним фактором є не горизонтальне зчитування зліва направо (класична F-подібна модель), а вертикальний пріоритет, оскільки вертикальний перегляд є домінуючим навігаційним патерном у мобільних інтерфейсах. Таким чином, у критичних інтерфейсах (медичних, фінансових, навігаційних) ключову інформацію слід розміщувати у верхній частині видимої області, інакше вона систематично виявлятиметься пізніше користувачами будь-якого профілю.

4.3.2. Вікові відмінності

Гіпотеза про те, що старші користувачі матимуть достовірно довший час до першої фіксації (T_{ff}), не підтвердилася в об'єктивних даних айтрекінгу: статистично значущих вікових відмінностей у жодному з трьох екранів не виявлено. Проте у

суб'єктивних оцінках зручності старші учасники систематично давали гірші оцінки, особливо для першого екрана (пошук ціни та знижки). Це розходження між об'єктивними метриками погляду і суб'єктивним сприйняттям є практично важливим: традиційні показники продуктивності (час завдання, кількість помилок) можуть маскувати вікові відмінності у когнітивному навантаженні. Відповідно, оцінка доступності інтерфейсу виключно на основі поведінкових метрик ризикує недооцінити труднощі старших користувачів. Це узгоджується з висновком [36] про важливість суб'єктивних вимірів у юзабіліті-дослідженнях для вікових груп.

4.3.3. Вплив цифрової компетентності

Найбільш виразний ефект цифрової компетентності проявився у навігаційному завданні. Учасники з низькою цифровою компетентністю фіксували курсор на мапі дуже рано (медіана $T_{ff} = 1206$ мс), тоді як учасники з високою цифровою компетентністю спочатку зчитували числові дані інформаційної панелі і лише потім зверталися до курсора (медіана $T_{ff} = 4652$ мс). При цьому саме послідовне зчитування контексту корелювало з правильним розумінням поточного місцезнаходження на карті: учасники, які зрозуміли свою позицію на мапі, провели в зоні курсора майже вдвічі більше часу (714 мс проти 352 мс). Ці дані свідчать про те, що ефективна навігація в інтерфейсі потребує не швидкого реагування на візуальні маркери, а послідовного зчитування контексту. Результат перегукується з висновками [38] щодо відмінностей у патернах погляду між групами з різним рівнем цифрових навичок.

Гіпотеза про взаємодію вікового та цифрового факторів (очікувалось, що найгірші показники матиме група «старший вік + низька цифрова компетентність», а найкращі – «молодший вік + висока цифрова компетентність») в отриманих даних не підтвердилась: відмінності між цими підгрупами за об'єктивними метриками айтрекінгу виявились статистично незначущими в більшості завдань. Відсутність значущої взаємодії між факторами може пояснюватися кількома причинами: відносно невеликим розміром, достатньо низькою складністю тестових екранів, а також нерівномірним розподілом учасників між підгрупами.

4.3.4. Кореляція об'єктивних та суб'єктивних даних

Дослідження демонструє практичність мобільного айтрекінгу на основі фронтальної камери смартфона середнього класу: зібрані дані є достатньо надійними для виявлення стійких патернів уваги на рівні AOI, попри обмежену точність, притаманну камерним системам. Поєднання кількісних метрик погляду з суб'єктивними оцінками виявилось методологічно продуктивним: у ряді випадків саме анкетування фіксувало відмінності між групами, які не були помітні в даних айтрекінгу. Цей результат підтверджує рекомендації [29] щодо мультиметодного підходу в айтрекінг дослідженнях.

4.4. Багатокритеріальне колективне оцінювання якості дизайну досліджених екранів

За процедурою, формалізованою в розділі 2.8, для кожного з трьох екранів, досліджених у роботі, було обчислено комплексний показник якості дизайну DQI. Обчислення охоплювало два етапи: визначення вагових коефіцієнтів критеріїв експертним шляхом окремо для кожного типу екрана та згортку нормалізованих показників візуальної уваги в узагальнений показник.

4.4.1. Формування експертної групи та визначення вагових коефіцієнтів

Для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв сформовано групу з п'яти експертів: практикуючих фахівців із проєктування мобільних інтерфейсів та тестування зі стажем професійної діяльності не менше п'яти років. Кожен експерт виконав попарне порівняння критеріїв за дев'ятибальною шкалою окремо для кожного з трьох типів екранів; індивідуальні оцінки узагальнено середнім геометричним, що зберігає симетрію зворотній матриці парних порівнянь.

Пріоритети критеріїв змінюються залежно від призначення екрана. Для картки товару найвагомішими визнано помітність цільових елементів і суб'єктивну зручність; для екрана медичних результатів – охоплення аудиторії, оскільки невиявлення відхилення показника має найтяжчі наслідки; для навігаційної карти – помітність цільового елемента та цілеспрямованість сканування. Узагальнені матриці парних порівнянь наведено в таблицях 4.6–4.8.

Таблиця 4.6 – Матриця парних порівнянь критеріїв для картки товару

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
K ₁	1	3	2	3	2
K ₂	1/3	1	1/2	1	1/2
K ₃	1/2	2	1	2	1
K ₄	1/3	1	1/2	1	1/2
K ₅	1/2	2	1	2	1

Таблиця 4.7 – Матриця парних порівнянь критеріїв для екрана медичних результатів

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
K ₁	1	3	1/2	3	2
K ₂	1/3	1	1/4	1	1/2
K ₃	2	4	1	4	3
K ₄	1/3	1	1/4	1	1/2
K ₅	1/2	2	1/3	2	1

Таблиця 4.8 – Матриця парних порівнянь критеріїв для навігаційної карти

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
K ₁	1	3	2	2	3
K ₂	1/3	1	1/2	1/2	1
K ₃	1/2	2	1	1	2
K ₄	1/2	2	1	1	2
K ₅	1/3	1	1/2	1/2	1

Обчислені вектори вагових коефіцієнтів та значення відношення узгодженості подано в таблиці 4.9. Для всіх трьох матриць відношення узгодженості не перевищує 0,008, що підтверджує несуперечливість експертних суджень.

Таблиця 4.9 – Вагові коефіцієнти критеріїв за типами екранів

Тип екрана	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	CR
Картка товару	0,37	0,11	0,21	0,11	0,21	0,003
Медичні результати	0,26	0,09	0,41	0,09	0,15	0,008
Навігаційна карта	0,37	0,11	0,21	0,21	0,11	0,003

4.4.2. Розрахунок комплексного показника якості дизайну

Нормалізацію показників візуальної уваги виконано за формулами (2.1-2.3). Зони інтересу в межах одного екрана не є рівнозначними: пріоритетний коефіцієнт p_j відображає функціональну важливість зони для завдання користувача, а їхня сума дорівнює одиниці. Цільовій зоні, від виявлення якої безпосередньо залежить успіх взаємодії, призначено вищий пріоритет ($p = 0,6$), допоміжній – нижчий ($p = 0,4$). Узагальнений показник зони обчислено за формулою (2.5), а комплексний показник екрана з урахуванням пріоритетів – за формулою (2.6).

Елементом картки товару, що найбільш цікавий для дослідження, є блок знижки, тому йому призначено вищий пріоритет, а блоку ціни – нижчий. Блок ціни виявляється швидко (1672 мс) і охоплюється майже всіма учасниками, тоді як блок знижки виявляється пізно (3666 мс) і залишається непоміченим у 33% учасників, що зумовлює його нижчий узагальнений показник (Таблиця 4.10).

Комплексний показник екрану з урахуванням пріоритетів становить $DQI = 0,68$ (задовільний дизайн). Підвищений пріоритет проблемної зони знижки знижує підсумкову оцінку порівняно з рівно важливим усередненням, що відображає вищу значущість цього елемента для конверсії.

Показник вітаміну D в екрані медичних результатів містив відхилення від норми, тому його виявлення є критичнішим; цій зоні призначено вищий пріоритет,

а зоні глюкози – нижчий. Показник глюкози фіксується більшістю учасників за 3718 мс, тоді як показник вітаміну D досягається лише за 6563 мс і залишається непоміченим у 54,5% учасників, що дає низький узагальнений показник цієї зони (Таблиця 4.11).

Таблиця 4.10 – Розрахунок DQI для картки товару

Критерій	w_i	Зона знижки		Зона ціни	
		метрика	n_i	метрика	n_i
К ₁ помітність	0,37	$T_{ff} = 3666$ мс	0,30	$T_{ff} = 1672$ мс	0,74
К ₂ легкість опрацювання	0,11	$T_{fd} = 280$ мс	0,97	$T_{fd} = 310$ мс	0,82
К ₃ охоплення	0,21	$P_{nofix} = 0,33$	0,67	$P_{nofix} = 0,05$	0,95
К ₄ цілеспрямованість	0,11	$F_{noAOI}/F_{total}=0,20$	0,80	$F_{noAOI}/F_{total}=0,20$	0,80
К ₅ суб'єктивна зручність	0,21	$S_{subj} = 2,1$	0,72	$S_{subj} = 2,1$	0,72
Коефіцієнт зони p_j		0,6		0,4	
Узагальнений показник Q_j		0,60		0,80	

Таблиця 4.11 – Розрахунок DQI для екрана медичних результатів

Критерій	w_i	Зона вітаміну D		Зона глюкози	
		метрика	n_i	метрика	n_i
К ₁ помітність	0,26	$T_{ff} = 6563$ мс	0,07	$T_{ff} = 3718$ мс	0,50
К ₂ легкість опрацювання	0,09	$T_{fd} = 320$ мс	0,90	$T_{fd} = 310$ мс	0,95
К ₃ охоплення	0,41	$P_{nofix} = 0,55$	0,45	$P_{nofix} = 0,05$	0,95
К ₄ цілеспрямованість	0,09	$F_{noAOI}/F_{total} = 0,25$	0,75	$F_{noAOI}/F_{total} = 0,25$	0,75
К ₅ суб'єктивна зручність	0,15	$S_{subj} = 2,6$	0,60	$S_{subj} = 2,6$	0,60
Коефіцієнт зони p_j		0,6		0,4	
Узагальнений показник Q_j		0,44		0,76	

Комплексний показник екрана становить $DQI=0,57$ (потребує покращення). Оскільки критична зона вітаміну D має водночас найвищий пріоритет і найнижчий узагальнений показник ($Q = 0,44$), вона визначально знижує оцінку екрана. Це чітко

вказує саме на цю зону як на пріоритетну для доопрацювання: підвищення контрасту та колірного маркування нижнього показника.

Цільовим елементом навігаційної карти є кнопка пошуку паркування, тому їй призначено вищий пріоритет, а курсору поточного – нижчий. Учасники з низькою цифровою компетентністю зверталися до курсора вже за 1206 мс, тоді як частина учасників виявляла кнопку пошуку паркування повільніше (Таблиця 4.12).

Таблиця 4.12 – Розрахунок DQI для навігаційної карти

Критерій	w_i	Кнопка паркування		Курсор	
		метрика	n_i	метрика	n_i
К ₁ помітність	0,37	$T_{ff} = 3500$ мс	0,33	$T_{ff} = 2500$ мс	0,54
К ₂ легкість опрацювання	0,11	$T_{fd} = 270$ мс	0,90	$T_{fd} = 260$ мс	0,95
К ₃ охоплення	0,21	$P_{nofix} = 0,40$	0,60	$P_{nofix} = 0,15$	0,85
К ₄ цілеспрямованість	0,21	$F_{noAOI}/F_{total} = 0,30$	0,70	$F_{noAOI}/F_{total} = 0,30$	0,70
К ₅ суб'єктивна зручність	0,11	$S_{subj} = 2,3$	0,68	$S_{subj} = 2,3$	0,68
Коефіцієнт зони p_j		0,6		0,4	
Узагальнений показник Q_j		0,57		0,71	

Комплексний показник екрана становить $DQI = 0,62$ (задовільний дизайн, ближче до нижньої межі). Слабшою є цільова зона кнопки пошуку паркування.

Урахування пріоритетів зон підсилює вплив найважливіших елементів на підсумкову оцінку (Таблиця 4.13). У всіх трьох екранах пріоритетна зона виявилася водночас слабшою, тому комплексний показник знизився порівняно з рівноважливим усередненням, що коректно відображає недостатню якість саме критичних зон. Найнижчий показник (0,57) отримав екран медичних результатів, що відповідає найгострішій виявленій проблемі – невиявленню відхилення показника вітаміну D більшістю учасників. У кожному випадку показник указав на ту саму проблемну зону, що й якісний аналіз результатів, подавши її як єдину порівнянну величину.

4.5. Дизайн-рекомендації

На основі аналізу метрик T_{ff} , часу фіксацій у АОІ та суб'єктивних оцінок зручності сформульовано чотири дизайн-рекомендації для досліджених типів екранів.

Рекомендація 1 (e-commerce екрани): акційні пропозиції та індикатори знижок слід розміщувати в межах верхньої третини картки товару або безпосередньо поруч із ціновим блоком. Медіана T_{ff} для блоку ціни (АОІ 2) склала 1672 мс, тоді як для блоку знижки (АОІ 1) – 3666 мс; 33% учасників взагалі не зафіксували погляд на зоні знижки протягом завдання. Суб'єктивна оцінка помітності знижки в старшій групі погіршилась на 0,58 бала порівняно з молодшою групою, попри відсутність значущих відмінностей в об'єктивних метриках.

Рекомендація 2 (медичні екрани): показники з відхиленнями від норми потребують додаткового візуального акценту незалежно від їхнього вертикального розташування. Показник вітаміну D (АОІ 2) розташований у нижній третині екрану і досягав першої фіксації в 6563 мс проти 3718 мс для глюкози; 54,5% учасників взагалі не зафіксували на ньому погляд. Рекомендується поєднання кольорового маркування (червоного та жовтого) з вищим розміщенням блоку для показників поза нормою.

Рекомендація 3 (різновікові аудиторії): кількісні метрики айтрекінгу є недостатніми для оцінки зручності інтерфейсів, орієнтованих на старших користувачів. Статистично значущих відмінностей у T_{ff} та часі фіксацій між молодшою та старшою групами не виявлено, однак суб'єктивні оцінки зручності у старших учасників систематично були гіршими на 0,24-0,58 бали у всіх трьох завданнях. Це вказує на когнітивне навантаження, яке поведінкові метрики не реєструють.

Рекомендація 4 (картографічні інтерфейси): навігаційні кнопки дій мають бути відокремлені від інформаційних елементів карти контрастом форми, а не лише кольору. Кнопка «Паркування» (АОІ 1) отримала першу фіксацію лише у 54,5% учасників, хоча завдання прямо вимагало її знайти. Учасники з низькою цифровою

компетентністю знаходили кнопку раніше (медіана T_{ff} 1206 мс), але розуміли поточне місцезнаходження гірше.

4.6. Обмеження дослідження

Дослідження має такі обмеження. По-перше, використано статичні зображення екранів замість інтерактивного інтерфейсу, що не дозволяє оцінити вплив скролінгу, анімацій та взаємодії з інтерфейсом на розподіл уваги. По-друге, точність вимірювань залежить від умов освітлення, моделі пристрою та індивідуальних особливостей учасника. По-третє, розмір вибірки (55 учасників) може бути більшим для надійного аналізу взаємодій між факторами віку та цифрової компетентності. По-четверте, з визначених у Розділі 2 семи метрик візуальної уваги в поточному експерименті використано чотири (T_{ff} , T_{fd} , маршрут погляду, теплові карти); метрики частоти фіксацій (F_f), часу перебування на екрані (TS) та частоти фіксацій поза АОІ потребують окремого дослідження з більшою вибіркою та контрольованими умовами. По-п'яте, експериментом охоплено три з п'яти визначених типів екранів (картка товару, медичні результати, навігаційна карта); екрани підтвердження транзакцій та текстові екрани потребують подальшого дослідження. Подальші дослідження мають бути спрямовані на валідацію методу на інтерактивних інтерфейсах, збільшення вибірки, розширення набору аналізованих метрик та порівняння точності EyeSense зі спеціалізованим обладнанням.

4.7. Висновки

У четвертому розділі проведено експериментальне дослідження з 55 учасниками на трьох типових екранах мобільних додатків.

По-перше, просторова ієрархія елементів є домінантним фактором розподілу уваги. Розташування інформаційних елементів на екрані послідовно визначало порядок фіксацій незалежно від вікової групи та рівня цифрової компетентності учасників. Цей висновок підкреслює, що у критичних інтерфейсах (медичних, фінансових, навігаційних) пріоритетна інформація повинна розміщуватися у

верхній частині видимої зони – інакше вона систематично оброблятиметься пізніше або взагалі залишатиметься поза увагою.

По-друге, вік впливає в більшій мірі на суб'єктивне навантаження, ніж на об'єктивні патерни погляду. Статистично значущих відмінностей між молодшими та старшими учасниками в метриках айтрекінгу виявлено не було. Водночас старші учасники систематично гірше оцінювали зручність інтерфейсу. Це означає, що юзабіліті-оцінки, засновані виключно на поведінкових показниках, можуть недооцінювати когнітивне навантаження у старших користувачів; для повноцінної оцінки необхідні суб'єктивні вимірювання.

По-третє, цифрова компетентність визначає стратегії взаємодії, а не лише швидкість. Найбільш виразний ефект цифрової компетентності проявився у якісних відмінностях послідовності фіксацій: досвідченіші користувачі спочатку зчитували контекстну інформацію і лише потім зверталися до елемента дії, що корелювало з правильним розумінням інтерфейсу. Цей результат указує на необхідність проєктування інтерфейсів, які підтримують послідовне зчитування контексту, а не лише швидкий доступ до елементів управління.

По-четверте, мобільний айтрекінг на основі фронтальної камери смартфона середнього класу є практично придатним інструментом для дослідження АОІ-рівня. Зібрані дані виявилися достатньо надійними для виявлення стійких патернів уваги та міжгрупових відмінностей у стратегіях взаємодії. Це відкриває можливості для проведення масштабних польових досліджень без необхідності у дорогому спеціалізованому обладнанні.

По-п'яте, поєднання айтрекінгу з суб'єктивними оцінками є методологічно продуктивним: у частині результатів анкетування фіксувало відмінності між групами, які не виявлялися в об'єктивних метриках погляду. Це підтверджує доцільність мультиметодного підходу під час проведення дизайн-досліджень.

По-шосте, апробація багатокритеріального оцінювання показала, що комплексний показник якості дизайну DQI узгоджується з якісними результатами експерименту: для кожного екрана він вказав на ту саму проблемну зону, що й

елементний аналіз, подавши її як єдину порівнянну величину. Найнижчий показник отримав екран медичних результатів унаслідок низької помітності та неповного охоплення зони вітаміну D, що підтверджує придатність цього показника для кількісного ранжування проблемних зон.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на емпіричну валідацію методу оцінювання динамічних екранів: проведення контрольованого експерименту на екранах з прокручуванням і навігаційними переходами дозволить перевірити чутливість T-AOI-метрик і скоригувати порогові значення показників залученості. Крім того, перспективними є збільшення вибірки для надійного аналізу взаємодій між факторами (вік/цифрова компетентність), розширення набору патернів, а також порівняльний аналіз точності систем, що використовують камери смартфонів і стаціонарних трекерів у польових умовах.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності оцінювання дизайну мобільних інтерфейсів шляхом розробки та валідації методу та програмного засобу мобільного айтрекінгу на основі фронтальної камери смартфона. Отримано такі наукові результати:

1. На основі аналізу існуючих апаратних комплексів для айтрекінгу (настільних трекерів, мобільних окулярів, систем для імерсивних середовищ) та методів обробки даних (локалізація очей, гейз-трекінг) встановлено, що існуючі рішення для мобільного айтрекінгу мають обмеження щодо вартості, мобільності або точності. Виявлено, що жодне з наявних рішень не поєднує мобільну платформу на основі стандартної камери, Flutter-інтеграцію та цілісну формалізовану методику з класифікацією типів екранів. Визначено, що точність Eyedid SDK є достатньою для AOI-аналізу мобільних інтерфейсів при відстані 30-40 см.

2. Вперше розроблено модель інформаційної взаємодії користувача з мобільним інтерфейсом в умовах айтрекінг-дослідження, що формалізує процес взаємодії як чотирифазний цикл із трьома паралельними інформаційними каналами. Модель встановлює операційний зв'язок між фазами взаємодії та метриками айтрекінгу: фаза сенсорної реєстрації визначається через час до першої фіксації і частку учасників без фіксації в зоні інтересу AOI; фаза візуального декодування визначається через тривалість та частоту повторних фіксацій; фаза поведінкової реакції визначається через маршрут погляду і частку фіксацій поза зони інтересу AOI; фаза когнітивного інтерпретування визначається через розходження між об'єктивними метриками погляду і суб'єктивними оцінками зручності. Практичну значимість моделі підтверджено результатами експерименту: виявлений розрив суб'єктивних оцінок між молодшою та старшою групами (0,24-0,58 бала) за відсутності значущих відмінностей в об'єктивних метриках погляду відповідає прогнозу моделі щодо міжгрупової асиметрії саме у

фазі когнітивного інтерпретування, а не у фазі сенсорної реєстрації чи поведінкової реакції.

3. Вперше розроблено метод оцінювання дизайну статичних мобільних інтерфейсів, що включає набір метрик візуальної уваги (час до першої фіксації T_{ff} , тривалість фіксації T_{fd} , частота фіксацій F_f , маршрут погляду, теплові карти, час на екрані, частота фіксацій поза AOI), класифікацію типів екранів мобільних додатків із визначенням пріоритетних метрик для кожного типу та шестиетапний процес від планування до впровадження рекомендацій. Ключовою методологічною відмінністю від стандартних протоколів є класифікація екрану до початку збору даних та поєднання суб'єктивного оцінювання, що дозволило в подальшому виявити розбіжності між об'єктивними та суб'єктивними показниками, які неможливо виявити при єдиному підсумковому опитуванні.

4. Вперше розроблено метод оцінювання ефективності дизайну динамічних мобільних екранів, який за рахунок використання поняття часової зони інтересу (Temporal AOI, T-AOI) з прив'язкою до координат повного документа і тайм-кодів, паралельної реєстрації стану інтерфейсу під час сесії та розширеного набору метрик охоплення і залученості (глибина, швидкість і кількість зупинок прокрутки) дозволяє коректно аналізувати розподіл візуальної уваги в сценаріях із прокручуванням, навігаційними переходами та відеоконтентом, де стандартна AOI, прив'язана до статичних координат екрану, не забезпечує повної картини взаємодії.

5. Формалізовано правило прийняття рішення про якість дизайну мобільних інтерфейсів, що зводить різноманітні показники візуальної уваги до спільної шкали, зважає їх за визначеними експертним шляхом коефіцієнтами (методом аналізу ієрархій, окремо для кожного типу екрана) і узагальнює в комплексний показник якості дизайну DQI у межах від 0 до 1, який зіставляється з пороговими рівнями. Апробація на експериментальних даних показала узгодженість показника з якісними висновками дослідження: найнижчу оцінку отримав екран медичних результатів через низьку помітність та охоплення зони показника вітаміну D, що відповідає проблемі, виявленій у дослідженні.

6. Розроблено програмний засіб EyeSense – мобільний додаток з дворівневим конвеєром обробки сигналу: ЕМА-згладжування та адаптований I-DT, який реалізує запропонований метод та використовує фронтальну камеру смартфона для збору даних про рух погляду. Реалізовано алгоритми згладжування сирих даних (ЕМА-буфер), виявлення фіксацій (адаптований I-DT), побудови теплових карт (Gaussian KDE) та маршрутів погляду. Додаток підтримує повний цикл дослідження: від калібрування до хмарного завантаження анонімізованих результатів.

7. Проведено експериментальне дослідження з 55 учасниками (20-60 років, середній вік 37,2 року, 31 особа молодшої групи та 24 старшої) на трьох типових екранах мобільних додатків: картці товару, екрані медичних результатів та навігаційній карті. Встановлено, що просторова ієрархія є домінантним чинником розподілу уваги незалежно від віку та цифрової компетентності користувача. На екрані медичних результатів показник глюкози (АОІ 1, верхня зона) привертав перший погляд у 31 із 41 учасника, що мали хоча б одну фіксацію в АОІ, з медіанним T_{ff} 3718 мс; показник вітаміну D (АОІ 2, нижня зона) фіксували першим лише 10 учасників і він досягався за 6563 мс, а 54,5% учасників не зафіксували на ньому погляду взагалі. На картці товару зону ціни (АОІ 2) першою фіксували 27 учасників проти 16 для зони знижки (АОІ 1), медіанні T_{ff} склали 1672 мс та 3666 мс відповідно, а 33% учасників не звернули на знижку жодної уваги. Виявлено відмінності у стратегіях взаємодії залежно від рівня цифрової компетентності: на навігаційному екрані учасники з низькою компетентністю зверталися до курсора мапи вже через 1206 мс, тоді як досвідченіші користувачі звертали увагу на курсор лише після зчитування числових даних панелі, медіана T_{ff} склала 4652 мс. Учасники, які попередньо опрацьовували контекст, залишалися в зоні курсора вдвічі довше (714 мс проти 336 мс) і краще орієнтувалися на карті. Зафіксовано розбіжності між об'єктивними та суб'єктивними показниками у старших вікових групах: статистично значущих відмінностей у метриках айтрекінгу між групами не виявлено, проте суб'єктивні оцінки зручності у старших учасників були

систематично гіршими: різниця становила від 0,24 бала (пошук кнопки паркування) до 0,58 балів (помітність знижки) в усіх трьох завданнях. Загальний рівень зручності екрану медичних результатів виявився найвищим: 84% учасників оцінили пошук відхилень як легкий або дуже легкий, 82% – інтерпретацію їхньої серйозності.

8. Практична придатність розробленого методу та програмного засобу підтверджена в польових умовах: дані мобільного айтрекінгу на основі фронтальної камери смартфона середнього класу виявилися достатньо надійними для виявлення стійких патернів уваги та міжгрупових відмінностей у стратегіях взаємодії без лабораторного контролю. Зокрема, у всіх трьох експериментах охоплення АОІ склало від 45,5% до 63,6%, що свідчить про стійку реєстрацію сигналу в різних учасників і умовах. Методологічно продуктивним виявилось поєднання об'єктивних метрик із поєднанням суб'єктивним оцінюванням: у частині результатів анкетування фіксувало відмінності між групами, які залишалися непомітними в даних айтрекінгу. Різниця суб'єктивних оцінок зручності між молодшою та старшою групами (0,24-0,58 бала) не знайшла відображення в об'єктивних метриках, що підтверджує необхідність мультиметодного підходу. На основі отриманих даних сформульовано чотири дизайн-рекомендації з кількісним обґрунтуванням: розміщення акційних елементів у верхній третині картки товару, колірне маркування відхилень незалежно від вертикального розташування, подвійна валідація інтерфейсів для різних вікових груп, контраст навігаційних кнопок. Розроблений інструментарій може бути впроваджений у практику дизайн-досліджень компаній-розробників мобільних додатків, а також у навчальний процес підготовки фахівців зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія».

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Sensor tower. *Digital Intelligence & App Data Analysis by Sensor Tower*. URL: <https://sensortower.com/report/state-of-mobile-2026> (дата звернення: 14.04.2026).
2. Majumder A. S. The influence of UX design on user retention and conversion rates in mobile apps. 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.13407>.
3. Zammarchi G., Conversano C. Application of eye tracking technology in medicine: a bibliometric analysis. *Vision*. 2021. Т. 5, № 4. С. 56. URL: <https://doi.org/10.3390/vision5040056> (дата звернення: 20.12.2023).
4. Machine learning based on eye-tracking data to identify autism spectrum disorder: a systematic review and meta-analysis / Q. Wei та ін. *SSRN electronic journal*. 2022. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4100664> (дата звернення: 19.02.2024).
5. Auxiliary diagnosis of children with attention-deficit/hyperactivity disorder: an eye-tracking study with novel digital biomarkers (preprint) / Z. Liu та ін. *JMIR mHealth and uHealth*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2196/58927> (дата звернення: 22.12.2025).
6. Park S.-Y., Kang T.-W., Koo D.-K. Investigating eye movement and postural stability relationships using mobile eye-tracking and posturography: a cross-sectional study. *Bioengineering*. 2024. Т. 11, № 8. С. 742. URL: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11080742> (дата звернення: 12.11.2024).
7. An eye-tracking solution using consumer grade webcams for potential concussion diagnosis and evaluation / N. Caporusso, G. Sanders, B. Thaman, E. Hall. *2023 46th MIPRO ICT and electronics convention (MIPRO)*, м. Opatija, Croatia, 22–26 трав. 2023 р. 2023. URL: <https://doi.org/10.23919/mipro57284.2023.10159830> (дата звернення: 12.11.2024).
8. An eye tracking concussion assessment system with integrated mr-based sports vision training / K. Okada, S. Aoyagi, S. Fukumori, M. Yamamoto, H. Abutani. *SUI '24: ACM symposium on spatial user interaction*, м. Trier Germany. New York, NY, USA, 2024. С. 1–3. URL: <https://doi.org/10.1145/3677386.3688872> (дата звернення: 12.11.2024).
9. Application of eye-tracking in nursing research: a scoping review / H. Hu, H. Li, B. Wang, M. Zhang, B. Wu, X. Wu. *Nursing open*. 2024. Т. 11, № 2. URL: <https://doi.org/10.1002/nor2.2108> (дата звернення: 12.11.2024).
10. Schall A., Romano Bergstrom J. Introduction to eye tracking. *Eye tracking in user experience design*. 2014. С. 3–26. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-408138-3.00001-7> (дата звернення: 20.12.2023).
11. Bojko A. Eye tracking the user experience: a practical guide to research. Rosenfeld Media, LLC, 2013.

12. Eye tracking, usability, and user experience: a systematic review / J. Š. Novák, J. Masner, P. Benda, P. Šimek, V. Merunka. *International journal of human–computer interaction*. 2023. С. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2221600> (дата звернення: 24.11.2024).
13. Gu Y., Paracha S. When eyes tell a story ... an eye-tracking approach towards creating a fit-for-purpose learning management system for higher education. *2023 IEEE international conference on development and learning (ICDL)*, м. Макао, China, 9–11 листоп. 2023 р. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icdl55364.2023.10364509> (дата звернення: 10.11.2024).
14. Harel-Arbeli T., Palgi Y., Ben-David B. M. Sow in tears and reap in joy: eye tracking reveals age-related differences in the cognitive cost of spoken context processing. *Psychology and aging*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1037/pag0000753> (дата звернення: 24.11.2024)
15. Chiriboga-Casanova W., Medina-Medina N., Paderewski-Rodríguez P. Accessible web design for older adults: challenges and solutions. *ACM transactions on accessible computing*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1145/3763243> (дата звернення: 21.12.2025).
16. Using eye-tracking data to examine response processes in digital competence assessment for validation purposes / J. Bartolomé та ін. *Applied sciences*. 2025. Т. 15, № 3. С. 1215. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15031215> (дата звернення: 21.12.2025).
17. Białowas S., Szyszka A. Eye-tracking in marketing research. *Managing economic innovations – methods and instruments*. 2019. С. 91–104. URL: <https://doi.org/10.12657/9788379862771-6> (дата звернення: 20.12.2023).
18. Using eye tracking to reveal responses to the built environment and its constituents / H. Rosas, A. Sussman, A. Sekely, A. Lavdas. *Applied sciences*. 2023. Т. 13, № 21. С. 12071. URL: <https://doi.org/10.3390/app132112071> (дата звернення: 12.11.2024).
19. Adhanom I. B., MacNeilage P., Folmer E. Eye tracking in virtual reality: a broad review of applications and challenges. *Virtual reality*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00738-z> (дата звернення: 21.12.2023).
20. Evaluation of gaze depth estimation from eye tracking in augmented reality / S. Oney та ін. *ETRA '20: 2020 symposium on eye tracking research and applications*, м. Stuttgart Germany. New York, NY, USA, 2020. URL: <https://doi.org/10.1145/3379156.3391835> (дата звернення: 21.12.2023).
21. Integrating eye-tracking to augmented reality system for surgical training / S. Lu та ін. *Journal of medical systems*. 2020. Т. 44, № 11. URL: <https://doi.org/10.1007/s10916-020-01656-w> (дата звернення: 12.04.2026).

22. Шаманіна Т., Павленко В. Метод захисту інформації в комп'ютерних системах за даними айтрекінгу. Інформатика та математичні методи в моделюванні. 2021. Т. 11, № 1-2. С. 115–126.
23. Schweizer T., Wyss T., Gilgen-Ammann R. Detecting soldiers' fatigue using eye-tracking glasses: practical field applications and research opportunities. *Military medicine*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1093/milmed/usab509> (дата звернення: 21.12.2023).
24. Eye movements in vehicle control / A. Rosner та ін. *Eye movement research*. Cham, 2019. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20085-5_22 (дата звернення: 21.12.2023).
25. Pelgrim M. H., Espinosa J., Buchsbaum D. Head-mounted mobile eye-tracking in the domestic dog: a new method. *Behavior research methods*. 2022. URL: <https://doi.org/10.3758/s13428-022-01907-3> (дата звернення: 19.02.2024).
26. Irwin D. E., Carlson-Radvansky L. A., Andrews R. V. Information processing during saccadic eye movements. *Acta psychologica*. 1995. Т. 90, № 1-3. С. 261–273. URL: [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0001-6918(95)00024-0) (дата звернення: 15.12.2023).
27. Implementing mobile eye tracking in psychological research: a practical guide / X. Fu та ін. *Behavior research methods*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-024-02473-6> (дата звернення: 21.12.2025).
28. The fundamentals of eye tracking part 1: the link between theory and research question / R. S. Hessels та ін. *Behavior research methods*. 2024. Т. 57, № 1. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-024-02544-8> (дата звернення: 21.12.2025).
29. The fundamentals of eye tracking part 2: from research question to operationalization / I. T. C. Hooge та ін. *Behavior research methods*. 2025. Т. 57, № 2. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-024-02590-2> (дата звернення: 21.12.2025).
30. The fundamentals of eye tracking part 3: how to choose an eye tracker / M. Nyström та ін. *Behavior research methods*. 2025. Т. 57, № 2. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-024-02587-x> (дата звернення: 21.12.2025).
31. The fundamentals of eye tracking part 4: tools for conducting an eye tracking study / D. C. Niehorster та ін. *Behavior research methods*. 2025. Т. 57, № 1. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-024-02529-7> (дата звернення: 21.12.2025).
32. The fundamentals of eye tracking part 5: the importance of piloting / R. S. Hessels та ін. *Behavior research methods*. 2025. Т. 57, № 8. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-025-02737-9> (дата звернення: 21.12.2025).
33. GazeFollower: an open-source system for deep learning-based gaze tracking with web cameras / G. Zhu та ін. *Proceedings of the ACM on computer graphics and*

- interactive techniques*. 2025. Т. 8, № 2. С. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1145/3729410> (дата звернення: 21.12.2025).
34. CalibRead: unobtrusive eye tracking calibration from natural reading behavior / С. Liu та ін. *Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies*. 2024. Т. 8, № 4. С. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1145/3699737> (дата звернення: 21.12.2025).
 35. When is enough enough? Empirical guidelines to determine participant sample size for scene viewing studies / A. J. Hoogerbrugge та ін. *Behavior research methods*. 2025. Т. 57, № 9. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-025-02754-8> (дата звернення: 21.12.2025).
 36. Yu J. E., Chattopadhyay D. Reducing the search space on demand helps older adults find mobile UI features quickly, on par with younger adults. *CHI '24: CHI conference on human factors in computing systems*, м. Honolulu HI USA. New York, NY, USA, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1145/3613904.3642796> (дата звернення: 21.12.2025).
 37. Shoenfelt A., Isaacowitz D. M., Ebner N. C. Eye tracking in aging: challenges, best practices, and novel frontiers. *ACM transactions on applied perception*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1145/3733834> (дата звернення: 22.12.2025).
 38. Steinfeld N., Lev-On A., Abu-Kishk H. Measuring digital literacy with eye tracking: an examination of skills and performance based on user gaze. *Aslib journal of information management*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1108/ajim-04-2023-0120> (дата звернення: 22.12.2025).
 39. Usability and user experience of an mhealth app for therapy support of breast cancer patients: a mixed-methods approach using eye-tracking (preprint) / С. Anders та ін. *JMIR human factors*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.2196/50926> (дата звернення: 22.12.2025).
 40. Google books ngram viewer. *Google Books*. URL: https://books.google.com/ngrams/graph?content=eye-tracking&year_start=1900&year_end=2019&corpus=en-2019&smoothing=0 (дата звернення: 18.03.2023).
 41. Most advanced eye tracking system – Tobii Pro Spectrum. *Global leader in eye tracking for over 20 years – Tobii*. URL: <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/screen-based/tobii-pro-spectrum> (дата звернення: 22.03.2026).
 42. Gazepoint GP3 HD – iMotions. *iMotions*. URL: <https://imotions.com/products/hardware/gazepoint-gp3-hd/> (дата звернення: 22.03.2026).

43. Perfect for usability tests – mobile testing accessory. *Global leader in eye tracking for over 20 years – Tobii*. URL: <https://www.tobii.com/products/accessories/mobile-testing-accessory> (дата звернення: 18.03.2023).
44. Smith J. D., Vertegaal R., Sohn C. ViewPointer. *The 18th annual ACM symposium*, м. Seattle, WA, USA, 23–26 жовт. 2005 р. New York, New York, USA, 2005. URL: <https://doi.org/10.1145/1095034.1095043> (дата звернення: 22.03.2023).
45. Tobii Pro Glasses 3 | Latest in wearable eye tracking. *Global leader in eye tracking for over 20 years – Tobii*. URL: <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/wearables/tobii-pro-glasses-3> (дата звернення: 20.03.2023).
46. Meng X., Du R., Varshney A. Eye-dominance-guided foveated rendering. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2020. Т. 26, № 5. С. 1972–1980. URL: <https://doi.org/10.1109/tvcg.2020.2973442> (дата звернення: 22.03.2023).
47. Accelerating eye movement research via accurate and affordable smartphone eye tracking / N. Valliappan та ін. *Nature communications*. 2020. Т. 11, № 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18360-5> (дата звернення: 08.12.2024).
48. Yang S., Jin M., He Y. Continuous gaze tracking with implicit saliency-aware calibration on mobile devices. *IEEE transactions on mobile computing*. 2022. С. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1109/tmc.2022.3185134> (дата звернення: 08.12.2024).
49. Mokatren M., Kuflik T., Shimshoni I. Calibration-Free mobile eye-tracking using corneal imaging. *Sensors*. 2024. Т. 24, № 4. С. 1237. URL: <https://doi.org/10.3390/s24041237> (дата звернення: 08.12.2024).
50. Online Eye Tracking | Webcam eye-tracking software. *GazeRecorder*. URL: <https://gazerecorder.com/> (дата звернення: 19.02.2024).
51. Home. *myEye Project*. URL: <https://myeye.jimdofree.com> (дата звернення: 19.02.2024).
52. WebGazer.js: democratizing webcam eye tracking on the browser. *WebGazer.js: Democratizing Webcam Eye Tracking on the Browser*. URL: <https://webgazer.cs.brown.edu/> (дата звернення: 19.02.2024).
53. Online eye tracking software | Free trial – Sticky. *Global leader in eye tracking for over 20 years – Tobii*. URL: <https://www.tobii.com/products/software/remote-testing-software/sticky> (дата звернення: 19.02.2024).
54. iMotions Online – iMotions. *iMotions*. URL: <https://imotions.com/products/imotions-online/> (дата звернення: 19.02.2024).
55. Huynh S., Balan R. K., Ko J. IMon. *Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies*. 2021. Т. 5, № 4. С. 1–26. URL: <https://doi.org/10.1145/3494999> (дата звернення: 10.02.2025).

56. Smartphone-based eye tracking system using edge intelligence and model optimisation / N. Gunawardena, G. Lui, J. Ginige, B. Javadi. *Internet of things*. 2025. Т. 29. С. 101481. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101481> (дата звернення: 10.02.2025).
57. Heck M., Becker C., Deutscher V. Webcam eye tracking for desktop and mobile devices: a systematic review. *Hawaii international conference on system sciences*. 2023. URL: <https://doi.org/10.24251/hicss.2023.825> (дата звернення: 10.02.2025).
58. Hawkeye | Learn where people look in your products. *Hawkeye | Learn where people look in your products*. URL: <https://www.usehawkeye.com> (дата звернення: 19.02.2024).
59. Home-edite – VisualCamp. *VisualCamp*. URL: <https://visual.camp> (дата звернення: 19.02.2024).
60. Tobii customer portal. *Tobii Connect*. URL: <https://connect.tobii.com/s/article/eye-tracker-accuracy-and-precision> (дата звернення: 05.04.2023).
61. Tobii customer portal. *Tobii Connect*. URL: https://connect.tobii.com/s/article/What-is-the-latency-of-my-eye-tracker?language=en_US (дата звернення: 05.04.2023).
62. Tobii customer portal. *Tobii Connect*. URL: https://connect.tobii.com/s/article/tobii-eye-tracker-glossary?language=en_US (дата звернення: 05.04.2023).
63. What factors in your environment can affect gaze interaction?. *Tobii Dynavox Global*. URL: <https://www.tobiidynavox.com/blogs/support-articles/what-factors-in-your-environment-can-affect-gaze-interaction> (дата звернення: 01.04.2023).
64. Jia Y., Tyler C. W. Measurement of saccadic eye movements by electrooculography for simultaneous EEG recording. *Behavior research methods*. 2019. Т. 51, № 5. С. 2139–2151. URL: <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01280-8> (дата звернення: 28.12.2023).
65. Electrooculography: analysis on device control by signal processing. *International journal of advanced computer research*. 2018. Т. 8, № 3. С. 787–790.
66. Chennamma H., Yuan X. A survey on eye-gaze tracking techniques. *Indian journal of computer science and engineering*. 2013. Т. 4, № 5. С. 388–393.
67. Tobii customer portal. *Tobii Connect*. URL: <https://connect.tobii.com/s/article/What-is-dark-and-bright-pupil-tracking> (дата звернення: 28.12.2023).
68. Yuille A. L., Cohen D. S., Hallinan P. W. Feature extraction from faces using deformable templates. *CVPR '89: IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, м. San Diego, CA, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr.1989.37836> (дата звернення: 18.01.2024).
69. Hansen D. W., Qiang Ji. In the eye of the beholder: a survey of models for eyes and gaze. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2010. Т. 32,

- № 3. С. 478–500. URL: <https://doi.org/10.1109/tpami.2009.30> (дата звернення: 18.01.2024).
70. Kottwani A., Kumar A. Eye gaze estimation model analysis. 2022. (Препринт). URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22546.99522> (дата звернення: 07.02.2024).
 71. Yoo D. H., Chung M. J. A novel non-intrusive eye gaze estimation using cross-ratio under large head motion. *Computer vision and image understanding*. 2005. Т. 98, № 1. С. 25–51. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2004.07.011> (дата звернення: 08.02.2024).
 72. Non-contact eye gaze tracking system by mapping of corneal reflections / Dong Hyun Yoo та ін. *Fifth IEEE international conference on automatic face gesture recognition*, м. Washington, DC, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/afgr.2002.1004139> (дата звернення: 08.02.2024).
 73. Salvucci D. D., Goldberg J. H. Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. *The symposium*, м. Palm Beach Gardens, Florida, United States, 6–8 листоп. 2000 р. New York, New York, USA, 2000. URL: <https://doi.org/10.1145/355017.355028> (дата звернення: 06.04.2026).
 74. Mokatren M., Kuflik T., Shimshoni I. Calibration-Free mobile eye-tracking using corneal imaging. *Sensors*. 2024. Т. 24, № 4. С. 1237. URL: <https://doi.org/10.3390/s24041237> (дата звернення: 08.12.2024).
 75. Usability evaluation with eye tracking: the case of a mobile augmented reality application with historical images for urban cultural heritage / D. Szekely, S. Vert, O. Rotaru, and D. Andone. *Heritage*. 2023. Т. 6, № 3. С. 3256–3270. URL: <https://doi.org/10.3390/heritage6030172> (дата звернення: 08.12.2024).
 76. Investigating privacy perceptions and subjective acceptance of eye tracking on handheld mobile devices / N. Alsakar, Y. Abdrabou, S. Stumpf, M. Khamis. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*. 2023. Т. 7, ETRA. С. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1145/3591133> (дата звернення: 08.12.2024).
 77. Raschke M., Blascheck T., Burch M. Visual analysis of eye tracking data. *Handbook of human centric visualization*. New York, NY, 2013. С. 391–409. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7485-2_15 (дата звернення: 10.02.2025).
 78. Joseph A. W., Murugesh R. Potential eye tracking metrics and indicators to measure cognitive load in human-computer interaction research. *Journal of scientific research*. 2020. Т. 64, № 01. С. 168–175. URL: <https://doi.org/10.37398/jsr.2020.640137> (дата звернення: 10.02.2025).
 79. UEyes: understanding visual saliency across user interface types / Y. Jiang, L. Leiva, P. Houssel, H. Tavakoli, J. Kylmä, A. Oulasvirta. *CHI '23: CHI conference on human factors in computing systems*, м. Hamburg Germany. New York, NY, USA,

2023. URL: <https://doi.org/10.1145/3544548.3581096> (дата звернення: 10.02.2025).
80. Sunhem W., Pasupa K. A scenario-based analysis of front-facing camera eye tracker for UX/UI survey on mobile banking app. *2020 12th international conference on knowledge and smart technology (KST)*, м. Pattaya, Chonburi, Thailand, 29 січ. – 1 лют. 2020 р. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/kst48564.2020.9059376> (дата звернення: 10.02.2025).
 81. Evaluating the usability of mhealth apps: an evaluation model based on task analysis methods and eye movement data / Y. Shen, S. Wang, Y. Shen, S. Tan, Y. Dong, W. Qin, Y. Zhuang. *Healthcare*. 2024. Т. 12, № 13. С. 1310. URL: <https://doi.org/10.3390/healthcare12131310> (дата звернення: 10.02.2025).
 82. Real-world navigation with application: characteristics of gaze behavior and associated factors in older adults / S. Shimokihara, M. Maruta, G. Han, Y. Ikeda, T. Kamasaki, Y. Hidaka, Y. Akasaki, T. Tabira. *Innovation in aging*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1093/geroni/igad108> (дата звернення: 10.02.2025).
 83. Tupikovskaja-Omovie Z., Tyler D. J. Experienced versus inexperienced mobile users: eye tracking fashion consumers' shopping behaviour on smartphones. *International journal of fashion design, technology and education*. 2021. С. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1080/17543266.2021.1980614> (дата звернення: 10.02.2025).
 84. Dritsa S., Mallas A., Xenos M. Screen reading regions in social media comments: an eye-tracking analysis of visual attention on smartphones. *PCI 2023: 27th pan-hellenic conference on progress in computing and informatics*, Lamia Greece. New York, NY, USA, 2023. URL: <https://doi.org/10.1145/3635059.3635074> (date of access: 10.02.2025).
 85. 2023 digital benchmark explorer. *Contentsquare: all-in-one experience intelligence platform*. URL: <https://go.contentsquare.com/en/2023-digital-experience-benchmark-explorer> (дата звернення: 09.05.2026).
 86. Streamlining eye-tracking and observational data for field study visual analysis / Y. Zhang та ін. *Proceedings of the 2025 symposium on eye tracking research and applications (ETRA '25)*. New York, NY, USA, 2025. С. Article 98, 1–9. URL: <https://doi.org/10.1145/3715669.3725880>.
 87. Mercier J., Ertz O., Bocher E. Quantifying dwell time with location-based augmented reality: Dynamic AOI analysis on mobile eye tracking data with vision transformer. *Journal of eye movement research*. 2024. Т. 17, № 3. URL: <https://doi.org/10.16910/jemr.17.3.3> (дата звернення: 09.05.2026).
 88. Viewability prediction for online display ads / C. Wang та ін. *Proceedings of the 24th ACM international on conference on information and knowledge management (CIKM)*

- '15). New York, NY, USA, 2015. С. 413–422. URL: <https://doi.org/10.1145/2806416.2806536>.
89. Jeong J., Kim N., In H. Adaptive kinetic scrolling: kinetic scrolling for large datasets on mobile devices. *Applied sciences*. 2018. Т. 8, № 11. С. 2015. URL: <https://doi.org/10.3390/app8112015> (дата звернення: 10.05.2026).
90. Attention and information acquisition: comparison of mouse-click with eye-movement attention tracking / S. Egner та ін. *Journal of eye movement research*. 2018. Т. 11, № 6. URL: <https://doi.org/10.16910/jemr.11.6.4> (дата звернення: 10.05.2026).
91. Saaty T. L., Vargas L. G. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. Boston, MA : Springer US, 2012. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6> (дата звернення: 07.04.2026).
92. Duchowski A. T. Eye tracking methodology. Cham : Springer International Publishing, 2017. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57883-5> (дата звернення: 07.04.2026).
93. Eye tracking to understand impact of aging on mobile phone applications / A. Joseph, D. Shree, K. Saluja, A. Mukhopadhyay, R. Muruges, P. Biswas. *Design for tomorrow—volume 1*. Singapore, 2021. С. 315–326. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0041-8_27 (дата звернення: 10.02.2025).
94. Riverpod. *Riverpod*. URL: <https://riverpod.dev/> (дата звернення: 05.04.2026).
95. Go_router | Flutter package. *Dart packages*. URL: https://pub.dev/packages/go_router (дата звернення: 05.04.2026).
96. Prolific | Easily collect high-quality data from real people. *Prolific*. URL: <https://www.prolific.com/> (дата звернення: 24.02.2026).
97. Jakob N. Eyetracking web usability. Berkeley, CA : New Riders, 2010. 437 с.

ДОДАТКИ

Додаток А. Лістинг ключових модулів EyeSense

A.1. Точка входу (main.dart)

Файл main.dart відповідає за ініціалізацію застосунку: підключення Firebase, відкриття Hive-сховища, отримання анонімного UUID учасника та налаштування повноекранного режиму.

```
void main() async {
  WidgetsFlutterBinding.ensureInitialized();
  await Firebase.initializeApp(
    options: DefaultFirebaseOptions.currentPlatform,
  );
  await Hive.initFlutter();
  Hive.registerAdapter(ExperimentResultAdapter());
  await Hive.openBox<ExperimentResult>('experiment_results');
  final prefs = await SharedPreferences.getInstance();
  final profileRepo = ProfileRepository(prefs);
  profileRepo.incrementLaunchCount();
  final authService = AuthService(prefs);
  await authService.getOrCreateUserId();
  SystemChrome.setEnabledSystemUIMode(
    SystemUiMode.immersiveSticky,
  );
  final router = AppRouter(profileRepo).router;
  runApp(ProviderScope(child: MyApp(router: router)));
}
```

A.2. Сервіс відслідковування погляду (GazeTrackerService)

Singleton-обгортка над Eyedid SDK, яка керує lifecycle трекера, застосовує ЕМА-згладжування та здійснює дискретизацію даних погляду з інтервалом 150 мс.

```
class GazeTrackerService {
  static final GazeTrackerService _instance =
    GazeTrackerService._internal();
  factory GazeTrackerService() => _instance;
  GazeTrackerService._internal();

  GazeTracker? _gazeTracker;
  final _gazeBuffer = <Offset>[];
  double _smoothedGazeX = 0, _smoothedGazeY = 0;
  Timer? _samplingTimer;
  final List<GazePoint> recordedPoints = [];

  Future<void> initialize(String licenseKey) async {
```

```

final options = GazeTrackerOptionsBuilder()
    .setPreset(CameraPreset.fhd1920x1080)
    .setUseGazeFilter(true)
    .setUseBlink(false)
    .setUseUserStatus(false)
    .build();
_gazeTracker = await GazeTracker.initGazeTracker(
    licenseKey: licenseKey, options: options);
}

void _updateSmoothedGaze(double x, double y) {
    _gazeBuffer.add(Offset(x, y));
    if (_gazeBuffer.length > 10) _gazeBuffer.removeAt(0);
    double totalWeight = 0, wx = 0, wy = 0;
    for (int i = 0; i < _gazeBuffer.length; i++) {
        final w = pow(1.8, i).toDouble();
        totalWeight += w;
        wx += _gazeBuffer[i].dx * w;
        wy += _gazeBuffer[i].dy * w;
    }
    _smoothedGazeX = wx / totalWeight;
    _smoothedGazeY = wy / totalWeight;
}

void startRecording() {
    _samplingTimer = Timer.periodic(
        const Duration(milliseconds: 150), (_) {
            recordedPoints.add(GazePoint(
                x: _smoothedGazeX,
                y: _smoothedGazeY,
                timestamp: DateTime.now().millisecondsSinceEpoch,
            ));
        });
}

void stopRecording() => _samplingTimer?.cancel();
void release() => _gazeTracker?.stopTracking();
}

```

A.3. Модуль калібрування (*CalibrationService / CalibrationRepository*)

CalibrationRepository зберігає математичну модель корекції погляду у SharedPreferences та реалізує логіку примусового перекалібрування між сесіями. CalibrationService є тонкою обгорткою над колбеками Eyedid SDK і керує повним циклом 5-точкового калібрування.

```

// — CalibrationRepository —————
class CalibrationRepository {
    static const _kDone = 'calibration_done';
    static const _kData = 'sdk_calibration_data';
    static const _kLastId = 'last_calibration_launch_id';
}

```

```

final SharedPreferences _prefs;
CalibrationRepository(this._prefs);

bool get isCalibrationDone => _prefs.getBool(_kDone) ?? false;

Future<void> saveCalibrationData(String data) async {
  await _prefs.setBool(_kDone, true);
  await _prefs.setString(_kData, data);
  final launch = _prefs.getInt('app_launch_count') ?? 0;
  await _prefs.setInt(_kLastId, launch);
}

String? getSavedCalibrationData() => _prefs.getString(_kData);

/// true - від останнього калібрування був новий запуск.
bool getRequiredFlow() {
  final current = _prefs.getInt('app_launch_count') ?? 0;
  final lastId = _prefs.getInt(_kLastId) ?? 0;
  return isCalibrationDone && current > lastId;
}
}

// — CalibrationService (колбеки Eyedid SDK) —————
class CalibrationService with CalibrationDelegate {
  final CalibrationRepository _repo;
  final GazeTrackerService _tracker;
  final ValueNotifier<double> progressNotifier =
ValueNotifier(0);
  Offset? nextDotPosition;

  void startCalibration() =>
_tracker.gazeTracker?.startCalibration(CalibrationMode.default5)
;

  @override
  void onCalibrationNextXY(double x, double y) {
    nextDotPosition = Offset(x, y);
    Future.delayed(const Duration(milliseconds: 500), () =>
      _tracker.gazeTracker?.startCollectSamples());
  }

  @override
  void onCalibrationProgress(double p) =>
    progressNotifier.value = p; // 0.0 → 1.0

  @override
  void onCalibrationFinished(CalibrationData data) =>
    _repo.saveCalibrationData(data.toString());
}

```

A.4. Маршрутизатор та Riverpod-провайдери

AppBar інкапсулює GoRouter з redirect-захисниками, що перевіряють стан онбордингу та калібрування перед кожним переходом. Нижче наведено ключові провайдери Riverpod, які формують шар залежностей застосунку.

```
// — AppBar
class AppBar {
  final ProfileRepository _profile;

  late final GoRouter router = GoRouter(
    initialLocation: '/',
    redirect: _redirect,
    routes: [
      GoRoute(path: '/',
        builder: (_, __) => const SplashPage()),
      GoRoute(path: '/profile',
        builder: (_, __) => const ProfilePage()),
      GoRoute(path: '/calibration-instructions',
        builder: (_, __) => const
CalibrationInstructionsPage()),
      GoRoute(path: '/calibration',
        builder: (_, __) => const CalibrationPage()),
      GoRoute(path: '/experiments',
        builder: (_, __) => const ExperimentsPage()),
      GoRoute(path: '/experiment-presentation/:id',
        builder: (_, s) => ExperimentPresentationPage(
          id: s.pathParameters['id']!)),
      GoRoute(path: '/questionnaire/:id',
        builder: (_, s) => QuestionnairePage(
          id: s.pathParameters['id']!)),
      GoRoute(path: '/results/:id',
        builder: (_, s) => ResultsPage(
          id: s.pathParameters['id']!)),
    ],
  );

  String? _redirect(BuildContext context, GoRouterState state) {
    final loc = state.matchedLocation;
    if (!_profile.isOnboardingDone && loc != '/profile')
      return '/profile';
    if (_profile.isCalibrationRequired &&
      loc != '/calibration-instructions' && loc !=
'/calibration')
      return '/calibration-instructions';
    return null;
  }
}

// — Riverpod-провайдери
final authServiceProvider = Provider<AuthService>((ref) =>
  AuthService(ref.watch(sharedPreferencesProvider)));
```

```

final userIdProvider = FutureProvider<String>((ref) =>
    ref.watch(authServiceProvider).getOrCreateUserId());

final firebaseStorageProvider =
    Provider<FirebaseStorageService>((ref) =>
        FirebaseStorageService(FirebaseStorage.instance));

final imageGeneratorProvider =
    Provider<ImageGeneratorService>((ref) =>
        ImageGeneratorService());

final experimentsWithStatusProvider =
    FutureProvider.family<List<ExperimentWithStatus>, Locale>(
        (ref, locale) async {
            final box =
Hive.box<ExperimentResult>('experiment_results');
            final exps = ExperimentRepository.all(locale);
            return exps.map((e) => ExperimentWithStatus(
                experiment: e,
                isCompleted: box.containsKey(e.id),
            )).toList();
        },
    );

final localeProvider =
    StateProvider<Locale>((ref) => const Locale('en'));

```

A.5. Алгоритм виявлення фіксацій (I-DT)

Реалізація алгоритму дисперсійного порогу (Dispersion-Threshold Identification): вікно ковзного аналізу класифікує точки погляду як фіксацію, якщо їх просторова дисперсія не перевищує 40 пікселів, а тривалість кластера – не менше 100 мс.

```

List<GazeFixation> detectFixations(List<GazePoint> points) {
    final fixations = <GazeFixation>[];
    int start = 0;
    List<GazePoint> cluster = [];

    for (final point in points) {
        if (cluster.isEmpty) {
            cluster.add(point);
            continue;
        }
        final cx =
cluster.map((p)=>p.x).reduce((a,b)=>a+b)/cluster.length;
        final cy =
cluster.map((p)=>p.y).reduce((a,b)=>a+b)/cluster.length;
        final dist = sqrt(pow(point.x-cx,2) + pow(point.y-cy,2));
    }
}

```

```

        if (dist <= 40) {
            cluster.add(point);
        } else {
            final dur = cluster.last.timestamp -
cluster.first.timestamp;
            if (dur >= 100 && cluster.length >= 2) {
                fixations.add(GazeFixation(
                    x:          cx,
                    y:          cy,
                    duration:    dur,
                    startTime:   cluster.first.timestamp,
                    index:       fixations.length + 1,
                ));
            }
            cluster = [point];
        }
    }
    return fixations;
}

```

A.6. Побудова теплової карти (Gaussian KDE)

Тепловий растр формується за алгоритмом ядрової оцінки густини з ядром Гауса ($\sigma = 30$ пкс., $r = 60$ пкс.), нормалізується до максимального значення та відображається через 5-колірний градієнт (синій \rightarrow блакитний \rightarrow зелений \rightarrow жовтий \rightarrow червоний).

```

Future<ui.Image> buildHeatmap(
    List<GazePoint> points,
    Size screenSize,
) async {
    final w = screenSize.width.toInt();
    final h = screenSize.height.toInt();
    final heat = List.generate(h, (_) => List<double>.filled(w,
0));
    const sigma = 30.0;
    const r = 60;

    for (final pt in points) {
        final px = pt.x.toInt().clamp(0, w - 1);
        final py = pt.y.toInt().clamp(0, h - 1);
        for (int dy = -r; dy <= r; dy++) {
            for (int dx = -r; dx <= r; dx++) {
                final nx = (px + dx).clamp(0, w - 1);
                final ny = (py + dy).clamp(0, h - 1);
                final d2 = dx * dx + dy * dy;
                heat[ny][nx] += exp(-d2 / (2 * sigma * sigma));
            }
        }
    }
}

```



```

    }
    double maxVal = heat.expand((row) => row).reduce(max);
    final pixels = Uint8List(w * h * 4);
    for (int y = 0; y < h; y++) {
        for (int x = 0; x < w; x++) {
            final v = heat[y][x] / maxVal;
            if (v > 0.02) {
                final c = _heatColor(v); // 5-step gradient
                final i = (y * w + x) * 4;
                pixels[i] = c.red;
                pixels[i+1] = c.green;
                pixels[i+2] = c.blue;
                pixels[i+3] = (v * 200).toInt().clamp(0, 200);
            }
        }
    }
    return _pixelsToImage(pixels, w, h);
}

```

A.7. Побудова маршруту погляду (Gaze Plot)

GazePlotPainter – клас **CustomPainter**, що відображає фіксації у вигляді пронумерованих кіл, з'єднаних лініями саккад. Радіус кола лінійно масштабується відповідно до тривалості.

```

class GazePlotPainter extends CustomPainter {
    final List<GazeFixation> fixations;
    GazePlotPainter(this.fixations);

    @override
    void paint(Canvas canvas, Size size) {
        if (fixations.isEmpty) return;

        final linePaint = Paint()
            ..color = Colors.blue.withOpacity(0.5)
            ..strokeWidth = 1.5
            ..style = PaintingStyle.stroke;
        final fillPaint = Paint()
            ..color = Colors.blue.withOpacity(0.35)
            ..style = PaintingStyle.fill;
        final rimPaint = Paint()
            ..color = Colors.blue
            ..strokeWidth = 1
            ..style = PaintingStyle.stroke;

        // Лінії саккад
        for (int i = 1; i < fixations.length; i++) {
            canvas.drawLine(
                Offset(fixations[i-1].x, fixations[i-1].y),
                Offset(fixations[i].x, fixations[i].y),
                linePaint,
            );
        }
    }
}

```

```

    }

    // Кола + номери фіксацій
    for (int i = 0; i < fixations.length; i++) {
        final f = fixations[i];
        final r = (10 + f.duration / 1000 * 18).clamp(6.0,
35.0);
        final c = Offset(f.x, f.y);
        canvas.drawCircle(c, r, fillPaint);
        canvas.drawCircle(c, r, rimPaint);
        final tp = TextPainter(
            text: TextSpan(text: '${i+1}',
                style: TextStyle(color: Colors.white,
                    fontSize: r * 0.85,
                    fontWeight: FontWeight.bold)),
            textDirection: TextDirection.ltr,
        )..layout();
        tp.paint(canvas, c - Offset(tp.width/2, tp.height/2));
    }
}

@override
bool shouldRepaint(GazePlotPainter old) =>
    old.fixations != fixations;
}

```

A.8. Моделі даних (*GazeFixation*, *ExperimentResult*, *UserProfile*)

Доменний шар застосунку складається з трьох ключових моделей. *GazeFixation* зберігає параметри однієї фіксації. *ExperimentResult* є Hive-адаптованою моделлю сеансу. *UserProfile* серіалізується у JSON для *SharedPreferences*.

```

// — GazeFixation —————
class GazeFixation {
    final double x, y;           // центроїд (px)
    final int duration;          // тривалість (мс)
    final int startTime;         // час від початку запису (мс)
    final int index;             // порядковий номер

    const GazeFixation({
        required this.x, required this.y,
        required this.duration, required this.startTime,
        required this.index,
    });

    Map<String, dynamic> toJson() => {
        'x': x, 'y': y,
        'duration': duration, 'startTime': startTime,
        'index': index,
    };
}

```

```

}

// — ExperimentResult (Hive) —————
@HiveType(typeId: 0)
class ExperimentResult extends HiveObject {
    @HiveField(0) final String experimentId;
    @HiveField(1) final List<Map<String, dynamic>> gazeData;
    @HiveField(2) final Map<String, dynamic> answers;
    @HiveField(3) final DateTime completedAt;

    ExperimentResult({
        required this.experimentId,
        required this.gazeData,
        required this.answers,
        required this.completedAt,
    });
}

// — UserProfile (SharedPreferences JSON) —————
class UserProfile {
    final String prolificId;
    final int age;
    final String gender;

    factory UserProfile.fromJson(Map<String, dynamic> j) =>
        UserProfile(
            prolificId: j['prolificId'] as String,
            age:      j['age']          as int,
            gender:   j['gender']       as String,
        );

    Map<String, dynamic> toJson() =>
        {'prolificId': prolificId, 'age': age, 'gender': gender};
}

```

A.9. Завантаження до Firebase Storage

Після завершення дослідження функція `uploadExperimentResult()` програмно перемикає вкладки результатів, захоплює скриншоти через `RepaintBoundary` та послідовно завантажує PNG-файли і JSON-дані до Firebase Storage.

```

Future<void> uploadExperimentResult({
    required String userId,
    required int experimentId,
    required ExperimentResult result,
}) async {
    final dateStr =
        DateFormat('yyyyMMdd_HH:mm:ss').format(DateTime.now());
    final base = 'users/$userId/exp$experimentId';

    final heatBytes = await _captureWidget(heatmapKey);
    await _storage.ref('$base/heatmap_$dateStr.png')

```

```

        .putData(heatBytes, SettableMetadata(contentType:
`image/png`));

    final plotBytes = await _captureWidget(gazePlotKey);
    await _storage.ref(`$base/gazeplot_${dateStr}.png`)
        .putData(plotBytes, SettableMetadata(contentType:
`image/png`));

    final fixJson = jsonEncode(result.gazeData
        .map((g) => g.toJson()).toList());
    await _storage.ref(`$base/fixations_${dateStr}.json`)
        .putString(fixJson,
            metadata: SettableMetadata(contentType:
`application/json`));

    final answersJson = jsonEncode(result.answers);
    await _storage.ref(`$base/answers_${dateStr}.json`)
        .putString(answersJson,
            metadata: SettableMetadata(contentType:
`application/json`));
}

```

Додаток Б. Анкети та протоколи дослідження

Б.1. Скринінгова форма (*Prolific / Google Forms*)

Перед початком дослідження учасники заповнювали скринінгову форму, що складалася з чотирьох розділів. Нижче наведено повний перелік питань у хронологічному порядку.

Розділ 1 з 4. Основна інформація

1. Prolific ID – текстове поле для короткої відповіді.
2. Який ваш вік? – текстове поле з числовим вводом.
3. У вас є смартфон Android? Яка версія Android у вас встановлена? – Варіанти відповіді: Android 15 або вище, Android 14, Android 13, Android 12 або нижче, Я не знаю, В мене немає Android-смартфона.

Розділ 2 з 4. Цифрова компетентність

4. Наскільки легко вам встановлювати застосунки не з магазину Play Market? – Шкала від 1 до 5, де 1 означає «Дуже важко», а 5 означає «Дуже легко».
5. Наскільки легко змінювати дозволи додатків (доступ до камери)? – Шкала від 1 до 5, де 1 означає «Дуже важко», а 5 означає «Дуже легко».
6. Наскільки легко налаштовувати пристрій, коли цього вимагає додаток? – Шкала від 1 до 5, де 1 означає «Дуже важко», а 5 означає «Дуже легко».
7. Наскільки впевнено ви вирішуєте базові проблеми з телефоном? – Шкала від 1 до 5, де 1 означає «Дуже важко», а 5 означає «Дуже легко».
8. Загальний рівень володіння смартфоном? – Шкала від 1 до 5, де 1 означає «Новачок», а 5 означає «Експерт».

Розділ 3 з 4. Інструкції для кваліфікованих учасників

1. Завантажити інструкції – Учасник отримує PDF-файл з детальними інструкціями.
2. Завантажити та встановити APK – Учаснику надається пряме посилання на APK-файл застосунку EyeSense.

3. Пройти дослідження – необхідно виконати такі кроки: встановити застосунок, заповнити профіль, пройти калібрування, виконати 3 експерименти та завантажити результати.

4. Підтвердження завершення «Ви успішно пройшли всі 3 дослідження?» – Варіанти відповіді: «Так» або «Інше».

Б.2. Інструкція учасника

Учасники отримували PDF-інструкцію перед початком дослідження. Документ містив п'ять послідовних кроків.

Вимоги до пристрою та середовища: смартфон Android 15 або вище; стабільне інтернет-з'єднання; рівномірне природне освітлення; 10-15 хвилин у тихому місці.

Крок 1. Завантажити та встановити APK-файл. За потреби дозволити встановлення з невідомих джерел: Settings → Install unknown apps.

Крок 2. Заповнити профіль: Prolific ID, вік, стать. Натиснути Continue.

Крок 3. Пройти калібрування: сидіти на відстані 30-40 см від екрана, тримати голову нерухомо, стежити очима за червоною крапкою, моргати природно.

Крок 4. Послідовно пройти три експерименти: натиснути «Start» → переглянути екран → «Stop» → відповісти на 2 питання → завантажити результати.

Крок 5. Після завершення всіх трьох експериментів закрити застосунок та підтвердити завершення на Prolific.

Б.3. Анкета після кожного експерименту

Після перегляду кожного стимулу учасники відповідали на два питання. Шкала: 1 – «дуже легко / одразу», 5 – «дуже важко / не знайшов».

У межах експерименту 1, що стосувався картки товару, учасникам ставилися такі запитання: «Наскільки легко вам було знайти ціну на товар?», «Чи помітили ви знижку на товар?».

У межах експерименту 2, присвяченого екрану результатів аналізів, учасникам ставилися такі запитання: «Наскільки легко вам було знайти відхилення від норми?», «Чи зрозуміло позначено ступінь критичності відхилень?».

У межах експерименту 3, що стосувався карти паркінгу, учасникам ставилися такі запитання: «Наскільки швидко ви знайшли кнопку пошуку?», «Чи зрозуміло позначено ваше місцезнаходження на карті?».

Додаток В. Повні таблиці результатів експерименту

У цьому додатку наведено повні таблиці даних, зібраних під час проведення експериментального дослідження з мобільним айтрекінгом на платформі Prolific. Дані організовано у три групи: (1) аналіз зон інтересу (AOI) за кожним із трьох експериментів із зазначенням часових метрик та відповідей на опитування; (2) зведені результати опитування учасників; (3) агреговані показники фіксацій для кожного учасника за кожним експериментом – середня та медіанна тривалість фіксацій, мінімальне й максимальне значення, стандартне відхилення, середні координати погляду та їх розкид, а також сумарний час перебування на екрані.

Таблиця В.1 – Аналіз зон інтересу (AOI), Експеримент 1: Картка товару

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша AOI	Час до AOI (мс)	AOI 1 T_{tf} (мс)	AOI 1 Dwell (мс)	AOI 2 T_{tf} (мс)	AOI 2 Dwell (мс)	Q1 Ціна	Q1 Знижка
1	01733d1a-5bac-462d-aa27-f31e9fecbd9a	22	0.96	AOI1	11157	11157	670	-	-	1	1
2	099c5e28-b13f-4b05-a241-7daa2defe437	20	0.92	AOI1	1444	1444	695	-	-	2	4
3	0a90a10f-7a3b-4ae4-a4eb-ad82eb3aca6d	33	0.88	-	-	-	-	-	-	1	1
4	0b0f41ec-4152-4445-9c28-4462106e4f8a	53	0.64	AOI1	11842	11842	185	-	-	1	2
5	0f77e14b-4fad-4656-af40-e2261ccd267e	44	0.72	AOI2	677	-	-	677	1140	2	2
6	100fef9b-1518-4f4e-a841-d61d54527757	21	0.68	AOI2	191	3251	708	191	2550	1	1
7	101aec99-5807-4cd2-a55f-d71e2e738f93	50	0.76	AOI2	967	5872	1878	967	5604	1	3
8	17b39530-28bb-49ab-aa7f-539df4899f32	30	1.00	AOI2	324	-	-	324	1985	1	2
9	2cad2d15-2b05-4ff7-b887-540b8688af45	21	0.96	AOI2	0	1784	855	0	326	1	2
10	300ab5c2-8f1b-409b-af6e-5c7c6414c0ac	23	1.00	AOI2	162	3666	991	162	2158	2	2
11	3035874e-5935-40e9-b1ee-66e1c4d1c24c	55	0.60	AOI2	158	6547	316	158	4887	3	3

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша AOI	Час до AOI (мс)	AOI 1 T_{if} (мс)	AOI 1 Dwell (мс)	AOI 2 T_{if} (мс)	AOI 2 Dwell (мс)	Q1 Ціна	Q1 Знижка
12	3184b389-4985-41c0-8184-ea1c95bfaf2b	37	0.88	AOI2	2361	6198	618	2361	954	1	2
13	3600781a-b60a-48c7-b60b-aa894397b864	22	0.76	AOI1	3520	3520	2525	-	-	1	2
14	3d8a50ae-f445-4306-8bb1-acb796b42660	21	1.00	AOI2	2163	-	-	2163	998	1	1
15	3e1ab5bf-5cad-4016-8e14-2a4e2c7f4b24	32	0.84	-	-	-	-	-	-	2	2
16	4082c9de-3466-4006-9b69-a0a588cc00a9	29	0.92	AOI1	4796	4796	1176	11892	184	1	3
17	4137ad25-4d40-44cf-9701-05f9191b27a8	27	1.00	AOI1	3529	3529	479	10164	1733	1	2
18	429172bc-0fb8-4b75-965f-c79844b30ded	25	1.00	AOI1	1299	1299	1678	-	-	1	2
19	4f4a18f0-ae04-485c-b287-d1897de3da40	24	0.72	-	-	-	-	-	-	1	3
20	50f2cff9-1796-4647-9764-9ea2c842ef68	21	1.00	-	-	-	-	-	-	1	1
21	56d718d6-e016-403c-b5b9-11985b17a738	58	0.88	-	-	-	-	-	-	3	3
22	5855fe39-7374-4c3a-af3b-1f9cf5120cc2	39	1.00	AOI1	1108	1108	1140	-	-	2	2
23	58eab7f5-5e3a-4ebe-bf93-dbe7706062f1	24	0.92	AOI2	0	2177	2051	0	937	1	1
24	591311ef-23c2-44d1-93b8-1cce354d3e3f	56	0.84	AOI2	2901	-	-	2901	196	2	3
25	5f16c9b4-7a53-4c96-950a-cce19dc0b5a9	20	1.00	AOI2	0	-	-	0	2577	1	1
26	6fc39132-f97a-4feb-95b6-64c6ffbdd135	26	1.00	AOI1	10520	10520	465	-	-	2	3
27	76541536-6383-4743-acfb-466d4ebfd0a9	25	1.00	AOI2	330	-	-	330	1529	1	1
28	78e60996-ae25-4650-b867-34a638f37db3	50	0.80	AOI2	1657	6398	668	1657	2716	1	2
29	7996cdde-1abb-485f-91b4-bda4e8f56ba6	29	1.00	AOI2	3295	4024	740	3295	192	1	1
30	7a7f0df0-e143-426b-85f8-c1edadfd3bf2	56	0.96	AOI1	1174	1174	3099	4420	9186	3	3
31	84ef7cdd-2bcc-4ab1-be2e-ad9b50144a60	36	1.00	AOI1	354	354	853	2968	307	1	1
32	8ba3e62a-f68d-485b-8926-23b73a47f6d9	43	1.00	AOI2	3791	-	-	3791	200	1	1
33	94a102f2-2ecc-4874-9b4d-5868ae116b21	24	0.96	AOI2	1793	-	-	1793	1218	1	4
34	9aa84732-012a-401d-b4f3-d323399673ae	45	1.00	AOI2	4523	-	-	4523	163	1	1

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша AOI	Час до AOI (мс)	AOI 1 T_{if} (мс)	AOI 1 Dwell (мс)	AOI 2 T_{if} (мс)	AOI 2 Dwell (мс)	Q1 Ціна	Q1 Знижка
35	9adaf9e7-2953-4028-a289-ca1bf9fbee23	22	0.92	AOI2	1672	-	-	1672	516	1	3
36	a4693e53-2781-4319-b658-9bf27915a963	56	0.92	AOI2	0	6262	163	0	175	1	2
37	b113acff-2a22-4ac0-8bdf-016c2dd4d35b	52	0.96	AOI2	160	-	-	160	1455	1	3
38	b2330421-5486-4653-8416-42445dad5b7e	43	1.00	AOI2	538	1576	652	538	482	1	1
39	b5716b7a-cbaf-455f-aa42-f211c7bbafal	24	1.00	AOI2	5356	12590	1134	5356	1054	4	4
40	b6ac14ac-9d13-449d-a1a0-a380a0810e3e	51	0.80	AOI1	9452	9452	161	-	-	1	4
41	bf31d95e-fdef-43f3-9e6c-20ac0381a78a	53	0.68	AOI1	347	347	1069	-	-	3	3
42	bfb70e2a-4e1b-4383-92e3-e9e0bf9d643a	60	0.52	-	-	-	-	-	-	2	4
43	c01e630e-4be7-4dca-b3c4-c19f4a136913	29	1.00	AOI1	14071	14071	494	-	-	1	1
44	cde16116-4f34-4b49-b229-65aa6c6dfec5	43	1.00	AOI2	657	-	-	657	172	3	5
45	d089975c-d4ed-4f85-9cf1-1ec2b2ae398c	25	1.00	AOI2	2669	22282	152	2669	2006	3	2
46	d2d1052f-5a08-47b4-90ac-705ef7848259	21	0.88	-	-	-	-	-	-	1	1
47	d7d7866e-6170-478f-92f7-906514ed187f	59	0.80	AOI1	3807	3807	359	13716	1349	2	2
48	ed6ee126-0f8e-410f-978f-5429f3ebd821	55	0.88	AOI2	4673	-	-	4673	1317	1	1
49	f160e552-45bc-46ec-9ae6-53cad99bc6a4	53	0.88	-	-	-	-	-	-	1	2
50	f212681d-e405-4f77-91f3-1081ffc41741	55	1.00	AOI2	3359	-	-	3359	482	2	2
51	f257124f-03de-4a37-a79f-5ed224abe776	25	0.92	AOI1	3035	3035	2186	6631	2008	3	2
52	f4dab0e0-b31b-41c2-b5b5-ba2a52d5c753	24	1.00	AOI2	0	1721	1143	0	525	1	1
53	ffab9360-cb8f-41eb-b7a2-d37ebfc94aec	42	1.00	-	-	-	-	-	-	1	1

Таблиця В.2 – Аналіз зон інтересу (АОІ), Експеримент 2: Результати аналізів

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша АОІ	Час до АОІ (мс)	АОІ 1 T_f (мс)	АОІ 1 Dwell (мс)	АОІ 2 T_f (мс)	АОІ 2 Dwell (мс)	Q2 Аномал.	Q2 Тяжк.
1	01733d1a-5bac-462d-aa27-f31e9fecbd9a	22	0.96	АОІ1	3718	3718	3434	6461	1998	2	1
2	099c5e28-b13f-4b05-a241-7daa2defe437	20	0.92	АОІ1	2860	2860	499	5064	341	4	3
3	0a90a10f-7a3b-4ae4-a4eb-ad82eb3aca6d	33	0.88	АОІ1	1820	1820	556	-	-	2	1
4	0b0f41ec-4152-4445-9c28-4462106e4f8a	53	0.64	АОІ1	1663	1663	2227	-	-	2	2
5	0f77e14b-4fad-4656-af40-e2261ccd267e	44	0.72	-	-	-	-	-	-	2	2
6	100fef9b-1518-4f4e-a841-d61d54527757	21	0.68	-	-	-	-	-	-	2	1
7	101aec99-5807-4cd2-a55f-d71e2e738f93	50	0.76	-	-	-	-	-	-	1	1
8	17b39530-28bb-49ab-aa7f-539df4899f32	30	1.00	АОІ2	9146	-	-	9146	1282	1	1
9	2cad2d15-2b05-4ff7-b887-540b8688af45	21	0.96	-	-	-	-	-	-	2	2
10	300ab5c2-8f1b-409b-af6e-5c7c6414c0ac	23	1.00	АОІ1	0	0	176	6563	179	4	5
11	3035874e-5935-40e9-b1ee-66e1c4d1c24c	55	0.60	АОІ1	8907	8907	2219	-	-	3	2
12	3184b389-4985-41c0-8184-ea1c95bfaf2b	37	0.88	АОІ2	0	-	-	0	1200	2	2
13	3600781a-b60a-48c7-b60b-aa894397b864	22	0.76	АОІ2	12206	-	-	12206	1663	4	3
14	3d8a50ae-f445-4306-8bb1-acb796b42660	21	1.00	АОІ1	3789	3789	1025	12314	214	2	2
15	3e1ab5bf-5cad-4016-8e14-2a4e2c7f4b24	32	0.84	-	-	-	-	-	-	2	2
16	4082c9de-3466-4006-9b69-a0a588cc00a9	29	0.92	АОІ1	13710	13710	2590	17517	2974	1	1
17	4137ad25-4d40-44cf-9701-05f9191b27a8	27	1.00	АОІ1	3557	3557	1669	-	-	1	3
18	429172bc-0fb8-4b75-965f-c79844b30ded	25	1.00	АОІ1	10574	10574	1724	-	-	2	2
19	4f4a18f0-ae04-485c-b287-d1897de3da40	24	0.72	АОІ2	6631	-	-	6631	470	1	2
20	50f2cff9-1796-4647-9764-9ea2c842ef68	21	1.00	АОІ1	3238	3238	157	-	-	1	1
21	5855fe39-7374-4c3a-af3b-1f9cf5120cc2	39	1.00	АОІ1	5531	5531	204	8050	203	2	2

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша AOI	Час до AOI (мс)	AOI 1 T_{if} (мс)	AOI 1 Dwell (мс)	AOI 2 T_{if} (мс)	AOI 2 Dwell (мс)	Q2 Аномал.	Q2 Тяжк.
22	58eab7f5-5e3a-4ebe-bf93-dbe7706062f1	24	0.92	AOI1	17400	17400	2732	-	-	3	3
23	591311ef-23c2-44d1-93b8-1cce354d3e3f	56	0.84	AOI1	2561	2561	2958	5355	844	2	1
24	5f16c9b4-7a53-4c96-950a-cce19dc0b5a9	20	1.00	AOI1	945	945	2460	4927	764	1	1
25	6fc39132-f97a-4feb-95b6-64c6ffbdd135	26	1.00	AOI1	559	559	2675	21953	341	1	1
26	76541536-6383-4743-acfb-466d4ebfd0a9	25	1.00	AOI1	347	347	1204	-	-	1	2
27	78e60996-ae25-4650-b867-34a638f37db3	50	0.80	AOI2	3885	5518	8323	3885	8479	1	2
28	7996cdde-1abb-485f-91b4-bda4e8f56ba6	29	1.00	AOI1	8249	8249	184	-	-	1	1
29	7a7f0df0-e143-426b-85f8-c1edadfd3bf2	56	0.96	AOI1	20794	20794	1693	-	-	2	2
30	84ef7cdd-2bcc-4ab1-be2e-ad9b50144a60	36	1.00	-	-	-	-	-	-	1	1
31	8ba3e62a-f68d-485b-8926-23b73a47f6d9	43	1.00	-	-	-	-	-	-	1	1
32	94a102f2-2ecc-4874-9b4d-5868ae116b21	24	0.96	AOI1	2027	2027	844	-	-	1	1
33	9aa84732-012a-401d-b4f3-d323399673ae	45	1.00	AOI1	660	660	1484	-	-	1	1
34	9adaf9e7-2953-4028-a289-ca1bf9fbee23	22	0.92	AOI1	9090	9090	852	-	-	1	2
35	a4693e53-2781-4319-b658-9bf27915a963	56	0.92	AOI1	1343	1343	338	-	-	1	1
36	b113acff-2a22-4ac0-8bdf-016c2dd4d35b	52	0.96	AOI2	986	-	-	986	355	2	2
37	b181e93c-371a-4f40-8dc7-09d6b0ffc9d0	35	0.76	-	-	-	-	-	-	2	2
38	b2330421-5486-4653-8416-42445dad5b7e	43	1.00	AOI2	0	-	-	0	487	1	1
39	b5716b7a-cbaf-455f-aa42-f211c7bbafa1	24	1.00	AOI1	0	0	581	1074	627	1	1
40	b6ac14ac-9d13-449d-a1a0-a380a0810e3e	51	0.80	AOI2	7710	9050	166	7710	509	3	2
41	bf31d95e-fdef-43f3-9e6c-20ac0381a78a	53	0.68	-	-	-	-	-	-	2	1
42	bfb70e2a-4e1b-4383-92e3-e9e0bf9d643a	60	0.52	AOI1	3304	3304	3122	12509	1191	2	1
43	c01e630e-4be7-4dca-b3c4-c19f4a136913	29	1.00	AOI1	30538	30538	161	33894	3180	2	1
44	cde16116-4f34-4b49-b229-65aa6c6dfec5	43	1.00	AOI1	4004	4004	1037	6387	1337	2	3

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша AOI	Час до AOI (мс)	AOI 1 T_{if} (мс)	AOI 1 Dwell (мс)	AOI 2 T_{if} (мс)	AOI 2 Dwell (мс)	Q2 Аномал.	Q2 Тяжк.
45	d089975c-d4ed-4f85-9cf1-1ec2b2ae398c	25	1.00	AOI1	1352	1352	4388	4910	336	2	1
46	d2d1052f-5a08-47b4-90ac-705ef7848259	21	0.88	-	-	-	-	-	-	1	1
47	d7d7866e-6170-478f-92f7-906514ed187f	59	0.80	AOI1	0	0	159	-	-	2	2
48	ed6ee126-0f8e-410f-978f-5429f3ebd821	55	0.88	AOI2	12379	20024	1817	12379	374	2	3
49	f160e552-45bc-46ec-9ae6-53cad99bc6a4	53	0.88	-	-	-	-	-	-	1	2
50	f212681d-e405-4f77-91f3-1081ffc41741	55	1.00	AOI1	5519	5519	841	-	-	2	2
51	f257124f-03de-4a37-a79f-5ed224abe776	25	0.92	AOI1	1789	1789	1438	8029	1231	2	1
52	f4dab0e0-b31b-41c2-b5b5-ba2a52d5c753	24	1.00	AOI1	4188	4188	690	4992	324	2	2
53	ffab9360-cb8f-41eb-b7a2-d37ebfc94aec	42	1.00	AOI2	0	4782	827	0	858	1	1

Таблиця В.3 – Аналіз зон інтересу (АОІ), Експеримент 3: Карта паркінгу

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша АОІ	Час до АОІ (мс)	АОІ 1 T_{tr} (мс)	АОІ 1 Dwell (мс)	АОІ 2 T_{tr} (мс)	АОІ 2 Dwell (мс)	Q3 Кнопка	Q3 Локація
1	01733d1a-5bac-462d-aa27-f31e9fecbd9a	22	0.96	АОІ1	4279	4279	714	5690	1044	2	1
2	099c5e28-b13f-4b05-a241-7daa2defe437	20	0.92	АОІ1	3960	3960	339	-	-	2	2
3	0a90a10f-7a3b-4ae4-a4eb-ad82eb3aca6d	33	0.88	АОІ1	1871	1871	861	-	-	3	4
4	0b0f41ec-4152-4445-9c28-4462106e4f8a	53	0.64	АОІ2	856	-	-	856	1015	2	2
5	0f77e14b-4fad-4656-af40-e2261ccd267e	44	0.72	АОІ1	1769	1769	431	-	-	4	2
6	100fef9b-1518-4f4e-a841-d61d54527757	21	0.68	АОІ2	1821	3483	824	1821	2876	3	1
7	101aec99-5807-4cd2-a55f-d71e2e738f93	50	0.76	АОІ1	3200	3200	152	4839	478	1	1
8	17b39530-28bb-49ab-aa7f-539df4899f32	30	1.00	АОІ2	1181	-	-	1181	332	3	2
9	2cad2d15-2b05-4ff7-b887-540b8688af45	21	0.96	АОІ2	1688	-	-	1688	594	3	2
10	300ab5c2-8f1b-409b-af6e-5c7c6414c0ac	23	1.00	-	-	-	-	-	-	3	2
11	3035874e-5935-40e9-b1ee-66e1c4d1c24c	55	0.60	АОІ1	471	471	336	5446	848	3	2
12	3184b389-4985-41c0-8184-ea1c95bfaf2b	37	0.88	АОІ2	2699	-	-	2699	512	4	1
13	3600781a-b60a-48c7-b60b-aa894397b864	22	0.76	АОІ1	518	518	534	-	-	3	1
14	3d8a50ae-f445-4306-8bb1-acb796b42660	21	1.00	АОІ2	3178	-	-	3178	820	2	3
15	3e1ab5bf-5cad-4016-8e14-2a4e2c7f4b24	32	0.84	-	-	-	-	-	-	1	2
16	4082c9de-3466-4006-9b69-a0a588cc00a9	29	0.92	АОІ2	3094	8763	511	3094	3523	1	1
17	4137ad25-4d40-44cf-9701-05f9191b27a8	27	1.00	АОІ1	3517	3517	352	-	-	3	3
18	429172bc-0fb8-4b75-965f-c79844b30ded	25	1.00	АОІ1	6103	6103	167	7966	3128	2	2
19	4f4a18f0-ae04-485c-b287-d1897de3da40	24	0.72	АОІ1	1384	1384	165	2864	724	2	4
20	50f2cff9-1796-4647-9764-9ea2c842ef68	21	1.00	АОІ2	4986	-	-	4986	535	1	1
21	5855fe39-7374-4c3a-af3b-1f9cf5120cc2	39	1.00	-	-	-	-	-	-	2	2

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша AOI	Час до AOI (мс)	AOI 1 T_{tf} (мс)	AOI 1 Dwell (мс)	AOI 2 T_{tf} (мс)	AOI 2 Dwell (мс)	Q3 Кнопка	Q3 Локація
22	58eab7f5-5e3a-4ebe-bf93-dbe7706062f1	24	0.92	AOI2	0	3066	1174	0	4768	1	1
23	591311ef-23c2-44d1-93b8-1cce354d3e3f	56	0.84	AOI1	502	502	1185	4338	2048	2	1
24	5f16c9b4-7a53-4c96-950a-cce19dc0b5a9	20	1.00	AOI2	0	5024	714	0	717	2	2
25	6fc39132-f97a-4feb-95b6-64c6ffbdd135	26	1.00	AOI1	6685	6685	572	-	-	2	1
26	76541536-6383-4743-acfb-466d4ebfd0a9	25	1.00	AOI2	0	-	-	0	4316	2	1
27	78e60996-ae25-4650-b867-34a638f37db3	50	0.80	AOI1	1028	1028	3669	5847	2649	2	1
28	7996cdde-1abb-485f-91b4-bda4e8f56ba6	29	1.00	-	-	-	-	-	-	1	1
29	7a7f0df0-e143-426b-85f8-c1edadfd3bf2	56	0.96	AOI1	10874	10874	952	12195	342	4	2
30	84ef7cdd-2bcc-4ab1-be2e-ad9b50144a60	36	1.00	AOI1	4149	4149	659	-	-	1	1
31	8ba3e62a-f68d-485b-8926-23b73a47f6d9	43	1.00	-	-	-	-	-	-	1	1
32	94a102f2-2ecc-4874-9b4d-5868ae116b21	24	0.96	AOI2	5035	-	-	5035	3694	3	1
33	9aa84732-012a-401d-b4f3-d323399673ae	45	1.00	AOI2	4669	6377	1199	4669	818	1	1
34	9adaf9e7-2953-4028-a289-ca1bf9fbee23	22	0.92	AOI1	5509	5509	225	-	-	3	2
35	a4693e53-2781-4319-b658-9bf27915a963	56	0.92	AOI1	0	0	1016	-	-	3	3
36	b113acff-2a22-4ac0-8bdf-016c2dd4d35b	52	0.96	AOI2	349	2030	321	349	652	3	3
37	b181e93c-371a-4f40-8dc7-09d6b0ffc9d0	35	0.76	-	-	-	-	-	-	1	1
38	b2330421-5486-4653-8416-42445dad5b7e	43	1.00	AOI2	0	-	-	0	1867	1	1
39	b5716b7a-cbaf-455f-aa42-f211c7bbafa1	24	1.00	AOI2	5994	-	-	5994	329	2	2
40	b6ac14ac-9d13-449d-a1a0-a380a0810e3e	51	0.80	-	-	-	-	-	-	4	2
41	bf31d95e-fdef-43f3-9e6c-20ac0381a78a	53	0.68	AOI1	5687	5687	222	-	-	5	4
42	bfb70e2a-4e1b-4383-92e3-e9e0bf9d643a	60	0.52	AOI2	3141	-	-	3141	644	2	1
43	c01e630e-4be7-4dca-b3c4-c19f4a136913	29	1.00	AOI1	27348	27348	1420	32413	3970	2	1
44	cde16116-4f34-4b49-b229-65aa6c6dfec5	43	1.00	AOI2	5049	-	-	5049	989	1	2

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Перша AOI	Час до AOI (мс)	AOI 1 T_{tf} (мс)	AOI 1 Dwell (мс)	AOI 2 T_{tf} (мс)	AOI 2 Dwell (мс)	Q3 Кнопка	Q3 Локація
45	d089975c-d4ed-4f85-9cf1-1ec2b2ae398c	25	1.00	AOI2	506	-	-	506	2424	4	2
46	d1b4e483-b3e5-4545-b4b4-72451c0a501c	50	1.00	-	-	-	-	-	-	3	2
47	d2d1052f-5a08-47b4-90ac-705ef7848259	21	0.88	AOI1	0	0	666	-	-	1	1
48	d7d7866e-6170-478f-92f7-906514ed187f	59	0.80	AOI1	0	0	1409	-	-	3	2
49	ed6ee126-0f8e-410f-978f-5429f3ebd821	55	0.88	-	-	-	-	-	-	1	2
50	f212681d-e405-4f77-91f3-1081ffc41741	55	1.00	AOI1	3091	3091	498	-	-	3	2
51	f257124f-03de-4a37-a79f-5ed224abe776	25	0.92	AOI2	4050	-	-	4050	8694	2	2
52	f4dab0e0-b31b-41c2-b5b5-ba2a52d5c753	24	1.00	AOI1	11776	11776	182	-	-	3	2
53	ffab9360-cb8f-41eb-b7a2-d37ebfc94aec	42	1.00	AOI1	3941	3941	634	9202	651	2	2

Таблиця В.4 – Зведені результати опитування учасників дослідження

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Дата	Q1 Ціна	Q1 Знижка	Q2 Аномал.	Q2 Тяжк.	Q3 Кнопка	Q3 Локація
1	100fef9b-1518-4f4e-a841-d61d54527757	21	0.68	2026-02-05 20:35	1	1	2	1	3	1
2	d2d1052f-5a08-47b4-90ac-705ef7848259	21	0.88	2026-02-05 20:35	1	1	1	1	1	1
3	50f2cff9-1796-4647-9764-9ea2c842ef68	21	1.00	2026-02-05 20:35	1	1	1	1	1	1
4	b2330421-5486-4653-8416-42445dad5b7e	43	1.00	2026-02-05 20:35	1	1	1	1	1	1
5	c01e630e-4be7-4dca-b3c4-c19f4a136913	29	1.00	2026-02-05 20:35	1	1	2	1	2	1
6	cde16116-4f34-4b49-b229-65aa6c6dfec5	43	1.00	2026-02-05 20:35	3	5	2	3	1	2
7	94a102f2-2ecc-4874-9b4d-5868ae116b21	24	0.96	2026-02-05 20:44	1	4	1	1	3	1
8	7996cdde-1abb-485f-91b4-bda4e8f56ba6	29	1.00	2026-02-08 17:36	1	1	1	1	1	1
9	3184b389-4985-41c0-8184-ea1c95bfaf2b	37	0.88	2026-02-08 17:53	1	2	2	2	4	1
10	6fc39132-f97a-4feb-95b6-64c6ffbdd135	26	1.00	2026-02-08 17:53	2	3	1	1	2	1
11	101aec99-5807-4cd2-a55f-d71e2e738f93	50	0.76	2026-02-08 18:18	1	3	1	1	1	1
12	a4693e53-2781-4319-b658-9bf27915a963	56	0.92	2026-02-08 18:34	1	2	1	1	3	3

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Дата	Q1 Ціна	Q1 Знижка	Q2 Аномал.	Q2 Тяжк.	Q3 Кнопка	Q3 Локація
13	3e1ab5bf-5cad-4016-8e14-2a4e2c7f4b24	32	0.84	2026-02-08 19:07	2	2	2	2	1	2
14	099c5e28-b13f-4b05-a241-7daa2defe437	20	0.92	2026-02-08 19:32	2	4	4	3	2	2
15	300ab5c2-8f1b-409b-af6e-5c7c6414c0ac	23	1.00	2026-02-08 20:46	2	2	4	5	3	2
16	4f4a18f0-ae04-485c-b287-d1897de3da40	24	0.72	2026-02-13 12:30	1	3	1	2	2	4
17	76541536-6383-4743-acfb-466d4ebfd0a9	25	1.00	2026-02-13 12:30	1	1	1	2	2	1
18	4137ad25-4d40-44cf-9701-05f9191b27a8	27	1.00	2026-02-13 12:39	1	2	1	3	3	3
19	3d8a50ae-f445-4306-8bb1-acb796b42660	21	1.00	2026-02-13 12:39	1	1	2	2	2	3
20	f4dab0e0-b31b-41c2-b5b5-ba2a52d5c753	24	1.00	2026-02-13 12:39	1	1	2	2	3	2
21	9aa84732-012a-401d-b4f3-d323399673ae	45	1.00	2026-02-13 12:46	1	1	1	1	1	1
22	d7d7866e-6170-478f-92f7-906514ed187f	59	0.80	2026-02-13 12:57	2	2	2	2	3	2
23	9adaf9e7-2953-4028-a289-ca1bf9fbee23	22	0.92	2026-02-13 13:00	1	3	1	2	3	2
24	2cad2d15-2b05-4ff7-b887-540b8688af45	21	0.96	2026-02-13 13:03	1	2	2	2	3	2
25	b181e93c-371a-4f40-8dc7-09d6b0ffc9d0	35	0.76	2026-02-13 13:05	1	1	2	2	1	1

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Дата	Q1 Ціна	Q1 Знижка	Q2 Аномал.	Q2 Тяжк.	Q3 Кнопка	Q3 Локація
26	d089975c-d4ed-4f85-9cf1-1ec2b2ae398c	25	1.00	2026-02-13 13:20	3	2	2	1	4	2
27	429172bc-0fb8-4b75-965f-c79844b30ded	25	1.00	2026-02-13 13:28	1	2	2	2	2	2
28	8ba3e62a-f68d-485b-8926-23b73a47f6d9	43	1.00	2026-02-13 13:28	1	1	1	1	1	1
29	84ef7cdd-2bcc-4ab1-be2e-ad9b50144a60	36	1.00	2026-02-13 13:40	1	1	1	1	1	1
30	ffab9360-cb8f-41eb-b7a2-d37ebfc94aec	42	1.00	2026-02-13 13:53	1	1	1	1	2	2
31	f160e552-45bc-46ec-9ae6-53cad99bc6a4	53	0.88	2026-02-13 13:54	1	2	1	2	2	2
32	0a90a10f-7a3b-4ae4-a4eb-ad82eb3aca6d	33	0.88	2026-02-13 14:08	1	1	2	1	3	4
33	5855fe39-7374-4c3a-af3b-1f9cf5120cc2	39	1.00	2026-02-13 14:15	2	2	2	2	2	2
34	b6ac14ac-9d13-449d-a1a0-a380a0810e3e	51	0.80	2026-02-13 14:28	1	4	3	2	4	2
35	5f16c9b4-7a53-4c96-950a-cce19dc0b5a9	20	1.00	2026-02-13 14:49	1	1	1	1	2	2
36	58eab7f5-5e3a-4ebe-bf93-dbe7706062f1	24	0.92	2026-02-13 15:06	1	1	3	3	1	1
37	b5716b7a-cbaf-455f-aa42-f211c7bbafa1	24	1.00	2026-02-13 17:24	4	4	1	1	2	2
38	3600781a-b60a-48c7-b60b-aa894397b864	22	0.76	2026-02-17 18:47	1	2	4	3	3	1

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Дата	Q1 Ціна	Q1 Знижка	Q2 Аномал.	Q2 Тяжк.	Q3 Кнопка	Q3 Локація
39	01733d1a-5bac-462d-aa27-f31e9fecbd9a	22	0.96	2026-02-17 18:48	1	1	2	1	2	1
40	17b39530-28bb-49ab-aa7f-539df4899f32	30	1.00	2026-02-17 18:48	1	2	1	1	3	2
41	4082c9de-3466-4006-9b69-a0a588cc00a9	29	0.92	2026-02-17 18:54	1	3	1	1	1	1
42	f257124f-03de-4a37-a79f-5ed224abe776	25	0.92	2026-02-17 18:59	3	2	2	1	2	2
43	aae67377-3463-4b0c-ab51-1c3612d4c643	50	0.52	2026-02-17 19:18	-	-	-	-	1	4
44	d1b4e483-b3e5-4545-b4b4-72451c0a501c	50	1.00	2026-02-17 19:28	-	-	-	-	3	2
45	0f77e14b-4fad-4656-af40-e2261ccd267e	44	0.72	2026-02-17 19:31	2	2	2	2	4	2
46	78e60996-ae25-4650-b867-34a638f37db3	50	0.80	2026-02-17 19:40	1	2	1	2	2	1
47	f212681d-e405-4f77-91f3-1081ffc41741	55	1.00	2026-02-17 19:41	2	2	2	2	3	2
48	0b0f41ec-4152-4445-9c28-4462106e4f8a	53	0.64	2026-02-17 19:57	1	2	2	2	2	2
49	7a7f0df0-e143-426b-85f8-c1edadfd3bf2	56	0.96	2026-02-17 19:59	3	3	2	2	4	2
50	b113acff-2a22-4ac0-8bdf-016c2dd4d35b	52	0.96	2026-02-17 21:45	1	3	2	2	3	3
51	bfb70e2a-4e1b-4383-92e3-e9e0bf9d643a	60	0.52	2026-02-17 23:25	2	4	2	1	2	1

№	User ID	Вік	Цифр. комп.	Дата	Q1 Ціна	Q1 Знижка	Q2 Аномал.	Q2 Тяжк.	Q3 Кнопка	Q3 Локація
52	3035874e-5935-40e9-b1ee-66e1c4d1c24c	55	0.60	2026-02-18 01:24	3	3	3	2	3	2
53	591311ef-23c2-44d1-93b8-1cce354d3e3f	56	0.84	2026-02-18 01:55	2	3	2	1	2	1
54	ed6ee126-0f8e-410f-978f-5429f3ebd821	55	0.88	2026-02-18 03:36	1	1	2	3	1	2
55	bf31d95e-fdef-43f3-9e6c-20ac0381a78a	53	0.68	2026-02-18 03:37	3	3	2	1	5	4
56	56d718d6-e016-403c-b5b9-11985b17a738	58	0.88	2026-02-18 06:12	3	3	-	-	-	-

Таблиця В.5 – Агреговані показники фіксацій, Експеримент 1: Картка товару

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
1	01733d1a-5bac-462d-aa27-f31e9fecbd9a	13	564.6	335	161	1764	569	226.7	521.7	81.1	198.7	14680
2	099c5e28-b13f-4b05-a241-7daa2defe437	5	1013.8	796	344	2390	793.8	333.4	412.3	104.1	308.9	5069
3	0a90a10f-7a3b-4ae4-a4eb-ad82eb3aca6d	3	269.3	175	151	482	184.6	217.7	766.6	57.9	85.3	808
4	0b0f41ec-4152-4445-9c28-4462106e4f8a	12	744.8	511.5	158	3052	821.1	184.8	527.7	49.9	210.4	8938
5	0f77e14b-4fad-4656-af40-e2261ccd267e	1	570	570	570	570	0	95.2	543.3	0	0	1140
6	100fef9b-1518-4f4e-a841-d61d54527757	5	899.6	708	156	2394	919.3	177.1	496.9	83.7	211.1	4498
7	101aec99-5807-4cd2-a55f-d71e2e738f93	9	1022.6	668	151	3436	1133.1	294.3	460.4	100.3	257.2	9203
8	17b39530-28bb-49ab-aa7f-539df4899f32	4	578.5	175	150	1814	823.8	140.2	638.4	99.3	107.6	2314
9	2cad2d15-2b05-4ff7-b887-540b8688af45	3	642.7	747	326	855	279.5	164.5	351.9	173.7	225.9	1928
10	300ab5c2-8f1b-409b-af6e-5c7c6414c0ac	4	950.8	822.5	318	1840	653.4	305.6	478.3	102.6	251.2	3803
11	3035874e-5935-40e9-b1ee-66e1c4d1c24c	5	1172.6	660	159	2991	1188.4	146.3	452.3	72.5	202.1	5863
12	3184b389-4985-41c0-8184-ea1c95bfaf2b	8	430.9	434.5	151	954	279.2	310.9	410.9	97.2	196.7	3447
13	3600781a-b60a-48c7-b60b-aa894397b864	7	994.3	1137	153	2587	862	88.2	493.3	187.8	242.9	6960
14	3d8a50ae-f445-4306-8bb1-acb796b42660	8	411.4	169.5	157	1006	379.4	236.7	505.7	83.3	245.8	3291
15	3e1ab5bf-5cad-4016-8e14-2a4e2c7f4b24	3	230	181	160	349	103.6	183.3	878.2	58.3	300.2	690
16	4082c9de-3466-4006-9b69-a0a588cc00a9	23	621.3	385	157	2453	604.1	141.4	414.2	69.7	242	14291
17	4137ad25-4d40-44cf-9701-05f9191b27a8	16	384.1	316.5	159	1381	307.1	281.5	333.7	93.6	221.2	6146
18	429172bc-0fb8-4b75-965f-c79844b30ded	18	509.7	325.5	151	1870	525.8	225.4	390.1	219.3	288	9175
19	4f4a18f0-ae04-485c-b287-d1897de3da40	3	530	166	157	1267	638.3	166.2	489.1	68.2	266.1	1590
20	50f2cff9-1796-4647-9764-9ea2c842ef68	2	172	172	156	188	22.6	178.6	518.7	19.8	67.6	344
21	56d718d6-e016-403c-b5b9-11985b17a738	9	795	480	162	2186	719.9	26.3	351.8	48.4	67.8	7155

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
22	5855fe39-7374-4c3a-af3b-1f9cf5120cc2	7	633.1	432	168	1728	560.4	29.9	405.5	65.7	286.5	4432
23	58eab7f5-5e3a-4ebe-bf93-dbe7706062f1	6	643.5	534.5	226	1275	398	182.9	257.9	72.7	168.8	3861
24	591311ef-23c2-44d1-93b8-1cce354d3e3f	12	604.3	331	153	2190	599.3	159.8	536.4	65.3	214	7252
25	5932acdc-0682-4a59-84a2-953968ce7004	6	667.2	702	179	1128	418.6	203.7	489.8	114.4	292.8	4003
26	5f16c9b4-7a53-4c96-950a-cce19dc0b5a9	2	1288.5	1288.5	174	2403	1576.1	97.7	515.3	15.3	32.4	2577
27	6fc39132-f97a-4feb-95b6-64c6ffbdd135	20	544	324	153	2053	560.6	84.6	741.7	160.1	273.1	10881
28	76541536-6383-4743-acfb-466d4ebfd0a9	4	553.5	599.5	170	845	289	136.4	589.5	42.4	79.5	2214
29	78e60996-ae25-4650-b867-34a638f37db3	14	542	494	153	1403	376	195.2	523.9	120.4	257.8	23848
30	7996cdde-1abb-485f-91b4-bda4e8f56ba6	9	513.3	358	179	1904	550.7	214.2	399.6	125.9	256.9	4620
31	7a7f0df0-e143-426b-85f8-c1edadfd3bf2	17	548.9	371	153	1538	415.5	274.7	370.8	44.3	199	27993
32	84ef7cdd-2bcc-4ab1-be2e-ad9b50144a60	5	334	183	152	853	298.9	186.7	475.2	85.7	228.5	1670
33	8ba3e62a-f68d-485b-8926-23b73a47f6d9	2	1901	1901	200	3602	2405.6	339.1	584	11.8	120.9	3802
34	94a102f2-2ecc-4874-9b4d-5868ae116b21	17	396.7	354	156	1427	317.4	204	439.8	74.5	250.4	6744
35	9aa84732-012a-401d-b4f3-d323399673ae	7	308.1	169	157	657	202.3	180.3	453.6	50.6	143.8	2157
36	9adaf9e7-2953-4028-a289-ca1bf9fbee23	4	760.5	718.5	516	1089	239.1	117.5	542.3	58.4	242.3	3042
37	a4693e53-2781-4319-b658-9bf27915a963	10	270.4	186	157	499	135.7	165.4	215.1	89.3	164.4	2704
38	b113acff-2a22-4ac0-8bdf-016c2dd4d35b	9	454.3	338	155	1184	334.6	182.6	550.9	88.5	161.5	4089
39	b2330421-5486-4653-8416-42445dad5b7e	2	567	567	482	652	120.2	202.2	336.3	189.1	286.7	1134
40	b5716b7a-cbaf-455f-aa42-f211c7bbafa1	14	452.6	290.5	160	1408	382.1	164.5	565.8	78.7	215.3	12674
41	b6ac14ac-9d13-449d-a1a0-a380a0810e3e	20	450.9	320.5	151	2412	512.1	194.6	619.1	85.4	254.2	9018
42	bf31d95e-fdef-43f3-9e6c-20ac0381a78a	4	368.8	372	181	550	192.6	190.4	272.8	72.5	140.2	1475
43	bfb70e2a-4e1b-4383-92e3-e9e0bf9d643a	12	719.3	582	160	2056	556.8	108.6	691.2	27.6	211.8	8632
44	c01e630e-4be7-4dca-b3c4-c19f4a136913	14	1041.9	342	161	4620	1447.1	183.3	671.2	71.9	250.4	14586

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
45	cde16116-4f34-4b49-b229-65aa6c6dfec5	14	433.4	259	164	1339	393.6	182.9	636	57.5	187.3	6067
46	d089975c-d4ed-4f85-9cf1-1ec2b2ae398c	21	616.7	345	152	1882	557	169.3	430.8	73.3	208.1	12950
47	d2d1052f-5a08-47b4-90ac-705ef7848259	1	162	162	162	162	-	300.6	230.6	-	-	162
48	d7d7866e-6170-478f-92f7-906514ed187f	27	486	333	150	1949	477	-13.7	338.1	117.7	140.2	13122
49	ed6ee126-0f8e-410f-978f-5429f3ebd821	10	445.1	224	156	1066	384.4	246.2	473.8	169.7	213.3	4451
50	f160e552-45bc-46ec-9ae6-53cad99bc6a4	1	158	158	158	158	-	104.2	382.9	-	-	158
51	f212681d-e405-4f77-91f3-1081ffc41741	8	368.5	245	158	1021	298.8	220.9	426.5	54.3	145.6	2948
52	f257124f-03de-4a37-a79f-5ed224abe776	12	530.8	342.5	155	2008	540	251.7	375.1	72.5	256.7	6369
53	f4dab0e0-b31b-41c2-b5b5-ba2a52d5c753	7	479.9	174	155	1143	439.7	178.1	617.8	86.5	236.2	3359
54	ffab9360-cb8f-41eb-b7a2-d37ebfc94aec	4	464.2	250.5	161	1195	493.8	177	722.7	77.2	92.1	1857

Таблиця В.6 – Агреговані показники фіксацій, Експеримент 2: Результати аналізів

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
1	01733d1a-5bac-462d-aa27-f31e9fecbd9a	18	380.6	249.5	152	1648	358.4	223.6	558.9	90.5	147.3	13702
2	099c5e28-b13f-4b05-a241-7daa2defe437	13	326.1	326	161	856	205.6	306.7	486	55.3	144.8	4239
3	0a90a10f-7a3b-4ae4-a4eb-ad82eb3aca6d	6	748.5	772	160	1563	554.2	190.9	591.6	82.7	170.7	4491
4	0b0f41ec-4152-4445-9c28-4462106e4f8a	7	769.9	464	178	2227	708	180.8	491.2	49.1	122.6	5389
5	0f77e14b-4fad-4656-af40-e2261ccd267e	5	513.4	457	181	1046	322.7	166	415.5	56.5	241	2567
6	100fef9b-1518-4f4e-a841-d61d54527757	8	637.4	510	325	1243	353.4	123.7	470.9	56.9	197.5	5099
7	101aec99-5807-4cd2-a55f-d71e2e738f93	6	687.3	836.5	159	1128	430.9	261.4	597.1	107.8	258.6	4124
8	17b39530-28bb-49ab-aa7f-539df4899f32	13	629.7	472	157	2046	548	142.5	543.1	94.8	281.5	8186
9	2cad2d15-2b05-4ff7-b887-540b8688af45	6	396	242	168	872	299.9	133.5	624.3	40.7	165.5	2376
10	300ab5c2-8f1b-409b-af6e-5c7c6414c0ac	9	358.9	330	162	864	220	189.3	582.5	82.9	193.3	3230
11	3035874e-5935-40e9-b1ee-66e1c4d1c24c	9	1285.7	808	482	3723	1022.5	131.5	437.2	94.5	176.5	11571
12	3184b389-4985-41c0-8184-ea1c95bfaf2b	2	696	696	192	1200	712.8	281.7	763.9	104	69.2	1392
13	3600781a-b60a-48c7-b60b-aa894397b864	12	523.6	506	151	1663	446.8	199.2	482.2	73.7	218.7	6283
14	3d8a50ae-f445-4306-8bb1-acb796b42660	13	464.8	360	162	1304	336.2	145.9	530	63.8	123.5	6042
15	3e1ab5bf-5cad-4016-8e14-2a4e2c7f4b24	4	207.8	177	162	315	71.9	241.4	986.6	43.2	96	831
16	4082c9de-3466-4006-9b69-a0a588cc00a9	20	821.2	553.5	174	4794	974.2	-2.8	467.1	68.5	196.1	16424
17	4137ad25-4d40-44cf-9701-05f9191b27a8	12	320.9	331.5	154	657	165.8	236.6	353.6	71.9	217.1	3851
18	429172bc-0fb8-4b75-965f-c79844b30ded	21	604.1	500	150	1926	481.7	171.8	439.2	57.6	161.4	12686
19	4f4a18f0-ae04-485c-b287-d1897de3da40	10	385.2	176.5	152	1496	426.5	113	546.3	65.3	191.6	3852
20	50f2cff9-1796-4647-9764-9ea2c842ef68	4	597.2	520	157	1192	518.7	258.7	533.7	96.4	68.7	2389
21	5855fe39-7374-4c3a-af3b-1f9cf5120cc2	14	818.5	550.5	161	3265	875.7	-1.2	437.2	75.2	219.6	11459

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
22	58eab7f5-5e3a-4ebe-bf93-dbe7706062f1	29	684.7	360	152	4588	923.7	196.8	391.1	70.6	138.8	19857
23	591311ef-23c2-44d1-93b8-1cce354d3e3f	16	462.4	343.5	160	1923	436.8	202.7	558.9	54.2	143.7	7398
24	5932acdc-0682-4a59-84a2-953968ce7004	11	598.2	333	151	1570	553.4	161.3	717.3	149.2	94.2	6580
25	5f16c9b4-7a53-4c96-950a-cce19dc0b5a9	7	554	431	166	1281	364.1	260.8	617.3	124.8	86.7	3878
26	6fc39132-f97a-4feb-95b6-64c6ffbdd135	23	458.3	398	156	1699	343.7	123.3	658.4	108.5	161.1	10540
27	72cc385e-e139-41f5-9d4b-ad90afedbc11	3	178.7	183	157	196	19.9	147.2	432.2	60.5	297.7	536
28	76541536-6383-4743-acfb-466d4ebfd0a9	12	280.5	186.5	155	662	163.6	162.4	492.2	78.9	154.3	3366
29	78e60996-ae25-4650-b867-34a638f37db3	10	691.9	521.5	153	2939	637.1	302.7	527.5	200.9	258.7	33212
30	7996cdde-1abb-485f-91b4-bda4e8f56ba6	13	300.1	210	158	882	208.3	207.1	640.4	124.2	205.6	3901
31	7a7f0df0-e143-426b-85f8-c1edadfd3bf2	34	531.6	354	159	2012	447	304.9	453.8	103.9	149.5	18075
32	84ef7cdd-2bcc-4ab1-be2e-ad9b50144a60	10	647.8	575	161	1352	425	160.5	344.7	91.9	91.3	6478
33	8ba3e62a-f68d-485b-8926-23b73a47f6d9	1	1963	1963	1963	1963	-	216.5	1154.2	-	-	1963
34	94a102f2-2ecc-4874-9b4d-5868ae116b21	16	268	201.5	155	650	165.3	190.1	486.5	83.7	115.3	4288
35	9aa84732-012a-401d-b4f3-d323399673ae	15	330.2	172	151	1152	274.4	152.4	539.8	54.7	86.2	4953
36	9adaf9e7-2953-4028-a289-ca1bf9fbee23	15	326.5	325	152	690	178	126.7	381.4	61.2	142.6	4898
37	a4693e53-2781-4319-b658-9bf27915a963	3	221	165	160	338	101.4	189	497.3	55.6	179.2	663
38	b113acff-2a22-4ac0-8bdf-016c2dd4d35b	4	208.5	177.5	159	320	75.5	149.9	669.9	114	70.3	834
39	b181e93c-371a-4f40-8dc7-09d6b0ffc9d0	1	161	161	161	161	-	126.5	465	-	-	161
40	b2330421-5486-4653-8416-42445dad5b7e	3	724.3	696	487	990	252.7	109	350.4	13.6	307.9	2173
41	b5716b7a-cbaf-455f-aa42-f211c7bbafa1	7	365.3	404	195	581	157	163	635.6	97.8	300.7	2557
42	b6ac14ac-9d13-449d-a1a0-a380a0810e3e	16	218.2	168	150	513	120.9	449.4	169.1	185.7	389.9	3492
43	bf31d95e-fdef-43f3-9e6c-20ac0381a78a	14	265.9	227	176	422	93.4	141.5	287.3	69.9	109.2	3723
44	bfb70e2a-4e1b-4383-92e3-e9e0bf9d643a	19	368.2	181	151	1191	283.2	296.1	544.3	83.5	77.7	6996

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
45	c01e630e-4be7-4dca-b3c4-c19f4a136913	15	694.5	349	161	3179	777	150.9	636.7	68.8	222.7	10417
46	cde16116-4f34-4b49-b229-65aa6c6dfec5	25	322.5	176	152	1173	232.1	205.1	621.8	62.5	209.5	8062
47	d089975c-d4ed-4f85-9cf1-1ec2b2ae398c	14	792.6	588.5	175	3047	773.5	173.8	495.5	76.7	208.8	11096
48	d2d1052f-5a08-47b4-90ac-705ef7848259	5	262.8	326	154	341	97.2	157.6	555.7	83.5	127.9	1314
49	d7d7866e-6170-478f-92f7-906514ed187f	12	249.3	167	155	701	160.4	29.6	317.5	95.1	181.9	2992
50	ed6ee126-0f8e-410f-978f-5429f3ebd821	20	704.3	377.5	152	2523	695	81.8	413.9	45	169.8	14086
51	f160e552-45bc-46ec-9ae6-53cad99bc6a4	2	158.5	158.5	156	161	3.5	425.6	1168.8	266	0.5	317
52	f212681d-e405-4f77-91f3-1081ffc41741	11	485.6	326	154	1691	479.1	205.1	424.8	91.2	147.5	5342
53	f257124f-03de-4a37-a79f-5ed224abe776	11	446.2	226	157	1025	316.7	253.4	463.3	114	232.9	4908
54	f4dab0e0-b31b-41c2-b5b5-ba2a52d5c753	16	363.3	189	157	1717	392.3	213.6	511.8	81.5	299.1	5813
55	ffab9360-cb8f-41eb-b7a2-d37ebfc94aec	12	405.8	341.5	158	706	219.8	191.3	575.8	84.7	170.8	4870

Таблиця В.7 – Агреговані показники фіксацій, Експеримент 3: Карта паркінгу

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
1	01733d1a-5bac-462d-aa27-f31e9fecbd9a	10	493.8	362.5	155	1505	401.4	235.9	565.2	84	203.9	9876
2	099c5e28-b13f-4b05-a241-7daa2defe437	8	294.2	334.5	151	483	115.3	145.6	325.2	142.5	142.2	2354
3	0a90a10f-7a3b-4ae4-a4eb-ad82eb3aca6d	7	366.1	173	151	725	267.7	229.1	460	111.7	217.7	2563
4	0b0f41ec-4152-4445-9c28-4462106e4f8a	4	888.8	771.5	339	1673	595.4	149.2	514.7	66.6	196.6	3555
5	0f77e14b-4fad-4656-af40-e2261ccd267e	3	480.7	431	261	750	248.3	278.9	404.9	119.4	180.7	1442
6	100fef9b-1518-4f4e-a841-d61d54527757	7	694.4	655	169	1188	366.9	185.7	493.1	18	180.1	4861
7	101aec99-5807-4cd2-a55f-d71e2e738f93	7	472.3	326	152	1522	484.7	233.3	610.6	88.2	206.6	3306
8	17b39530-28bb-49ab-aa7f-539df4899f32	10	267.1	251	154	508	120.2	174.8	576.7	99.3	216.7	2671
9	2cad2d15-2b05-4ff7-b887-540b8688af45	2	763	763	594	932	239	183.3	427.3	144.3	353.3	1526
10	300ab5c2-8f1b-409b-af6e-5c7c6414c0ac	6	437.7	246.5	154	1296	442.9	252.7	551.4	84.6	328.3	2626
11	3035874e-5935-40e9-b1ee-66e1c4d1c24c	8	341.4	196.5	163	848	260.7	195.8	349	68.2	278.8	2731
12	3184b389-4985-41c0-8184-ea1c95bfaf2b	5	413.8	198	159	1200	446.4	285.4	630.5	68.6	93.8	2069
13	3600781a-b60a-48c7-b60b-aa894397b864	2	631	631	534	728	137.2	106.7	379.6	39.6	39.9	1262
14	3d8a50ae-f445-4306-8bb1-acb796b42660	14	461.7	334	151	2002	482.2	135.3	638.4	68.6	215.9	6464
15	3e1ab5bf-5cad-4016-8e14-2a4e2c7f4b24	5	257.4	191	155	405	120.1	363.6	947.1	17.5	283.8	1287
16	4082c9de-3466-4006-9b69-a0a588cc00a9	17	717	511	314	3040	651	189.5	499.8	73.8	136.6	12189
17	4137ad25-4d40-44cf-9701-05f9191b27a8	12	294.2	182.5	152	836	203.6	316.2	299.3	58.5	179.4	3531
18	429172bc-0fb8-4b75-965f-c79844b30ded	12	700	356	151	3128	823.3	192.6	577	57.9	186.9	8400
19	4f4a18f0-ae04-485c-b287-d1897de3da40	9	303.2	177	152	832	230	133.9	497	89.6	211.6	2729
20	50f2cff9-1796-4647-9764-9ea2c842ef68	2	598.5	598.5	535	662	89.8	180.6	413.8	76.8	403.9	1197
21	5855fe39-7374-4c3a-af3b-1f9cf5120cc2	8	1137.8	394	154	3738	1290.4	37.9	408.6	79	215	9102

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
22	58eab7f5-5e3a-4ebe-bf93-dbe7706062f1	42	559.8	354	152	1560	445.9	193.9	297.5	43.6	245.1	23512
23	591311ef-23c2-44d1-93b8-1cce354d3e3f	10	586.2	425	159	1863	518.5	230.2	521.1	44.9	262.6	5862
24	5932acdc-0682-4a59-84a2-953968ce7004	7	689.4	318	169	1579	626.7	204.2	728.1	48.4	175.2	4826
25	5f16c9b4-7a53-4c96-950a-cce19dc0b5a9	5	543	697	155	717	248	245.3	406.8	87.6	245.4	2715
26	6fc39132-f97a-4feb-95b6-64c6ffbdd135	12	577.6	381	162	2253	612.5	55	624.2	98	294.6	6931
27	76541536-6383-4743-acfb-466d4ebfd0a9	8	582.8	269	155	1762	626.2	176.4	601.9	65.3	179.5	4662
28	78e60996-ae25-4650-b867-34a638f37db3	22	645.5	362	151	2279	587.9	221.8	448.7	146.3	324.8	18720
29	7996cdde-1abb-485f-91b4-bda4e8f56ba6	12	309.3	191	152	681	182.9	255.1	551.2	123.8	245	3712
30	7a7f0df0-e143-426b-85f8-c1edadfd3bf2	28	345.5	253.5	150	832	224.6	321	388.5	67.4	211.7	9674
31	84ef7cdd-2bcc-4ab1-be2e-ad9b50144a60	7	389.1	184	163	684	267.3	158.2	312.2	74.6	174.1	2724
32	8ba3e62a-f68d-485b-8926-23b73a47f6d9	2	784.5	784.5	198	1371	829.4	442.5	-4.9	143.1	135.3	1569
33	94a102f2-2ecc-4874-9b4d-5868ae116b21	9	645.9	333	167	1860	612.8	160.4	482.4	78.6	270.8	5813
34	9aa84732-012a-401d-b4f3-d323399673ae	10	485.6	418	154	1199	327.1	180.9	553	39.7	172.4	4856
35	9adaf9e7-2953-4028-a289-ca1bf9fbee23	8	488.2	218	162	1459	468.7	178.7	485.8	70	138.8	3906
36	a4693e53-2781-4319-b658-9bf27915a963	20	290.8	174	154	836	194.5	161.6	267.3	47.4	115	5817
37	aae67377-3463-4b0c-ab51-1c3612d4c643	8	228.4	177.5	167	505	114.5	-45.7	- 660.7	450.7	2178.5	1827
38	b113acff-2a22-4ac0-8bdf-016c2dd4d35b	9	201.4	169	152	467	100.1	123.4	473.3	71.8	229.2	1813
39	b181e93c-371a-4f40-8dc7-09d6b0ffc9d0	1	343	343	343	343	-	209.6	552.1	-	-	343
40	b2330421-5486-4653-8416-42445dad5b7e	6	556.8	330.5	172	1148	421.5	242.7	548.9	103.8	254.2	3341
41	b5716b7a-cbaf-455f-aa42-f211c7bbafal	7	931.3	707	242	2406	783	90.1	446.2	85.3	345.4	6519
42	b6ac14ac-9d13-449d-a1a0-a380a0810e3e	8	247.9	158	150	859	247.1	248.8	643.6	47.9	698.6	1983
43	bf31d95e-fdef-43f3-9e6c-20ac0381a78a	6	308.5	251.5	179	643	173.4	99.6	197.5	103.4	82.8	1851

№	User ID	Кількість фіксацій	Середня тривалість (мс)	Медіанна тривалість (мс)	Мін. (мс)	Макс. (мс)	Стд. відх. (мс)	Сер. X	Сер. Y	Відх. X	Відх. Y	Сум. час (мс)
44	bfb70e2a-4e1b-4383-92e3-e9e0bf9d643a	12	318.3	328	156	825	175.6	202.4	546.8	96.1	74.9	7640
45	c01e630e-4be7-4dca-b3c4-c19f4a136913	9	1975.9	818	325	7559	2397.2	156	441.2	91.9	246.7	17783
46	cde16116-4f34-4b49-b229-65aa6c6dfec5	10	362.9	330	162	662	214.1	213.3	600.6	76	211	3629
47	d089975c-d4ed-4f85-9cf1-1ec2b2ae398c	12	579.6	437	152	1525	452.1	223.9	548.9	66.5	211.7	6955
48	d1b4e483-b3e5-4545-b4b4-72451c0a501c	4	509.2	393	170	1081	396.4	328.6	594.1	43.2	407.5	2037
49	d2d1052f-5a08-47b4-90ac-705ef7848259	3	495.7	666	153	668	296.8	135.3	450.5	15.5	57.8	1487
50	d7d7866e-6170-478f-92f7-906514ed187f	20	382.3	335	156	1018	252.8	-2.3	307.2	164.5	122.5	7646
51	ed6ee126-0f8e-410f-978f-5429f3ebd821	8	206.9	170.5	151	492	115.6	106.5	340.1	39.2	170.8	1655
52	f212681d-e405-4f77-91f3-1081ffc41741	7	473.4	497	167	985	257.7	185.4	294.4	79.8	209.2	3314
53	f257124f-03de-4a37-a79f-5ed224abe776	12	618.4	349.5	150	2295	619.6	182.7	410.8	93.3	246.9	22263
54	f4dab0e0-b31b-41c2-b5b5-ba2a52d5c753	16	468.6	321	160	1367	430.8	213.8	510.1	82.2	266.2	7498
55	ffab9360-cb8f-41eb-b7a2-d37ebfc94aec	10	397.4	325.5	150	1001	276.3	168.8	469.5	71.1	193	3974

Додаток Г. Скріншоти EyeSense

У цьому додатку наведено скріншоти ключових екранів мобільного застосунку EyeSense, що ілюструють основний сценарій дослідження: від онбордингу до перегляду результатів.

Після першого запуску застосунку учаснику пропонується заповнити анонімний профіль: ввести Prolific ID, вік та стать. Ці дані зберігаються локально у SharedPreferences та використовуються для іменування файлів у Firebase Storage (Рисунок Г.1).

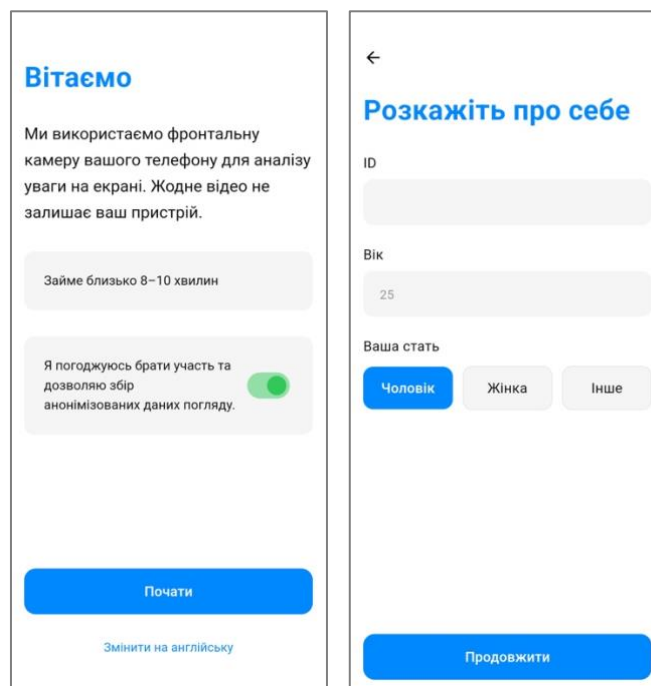


Рисунок Г.1 – Екрани онбордінгу та введення даних учасника

Перед початком кожного сеансу учасник проходить 5-точкове SDK-калібрування Eyedid. Червона крапка послідовно з'являється у п'яти позиціях екрана, а круговий індикатор відображає прогрес зчитування для кожної точки (Рисунок Г.2).

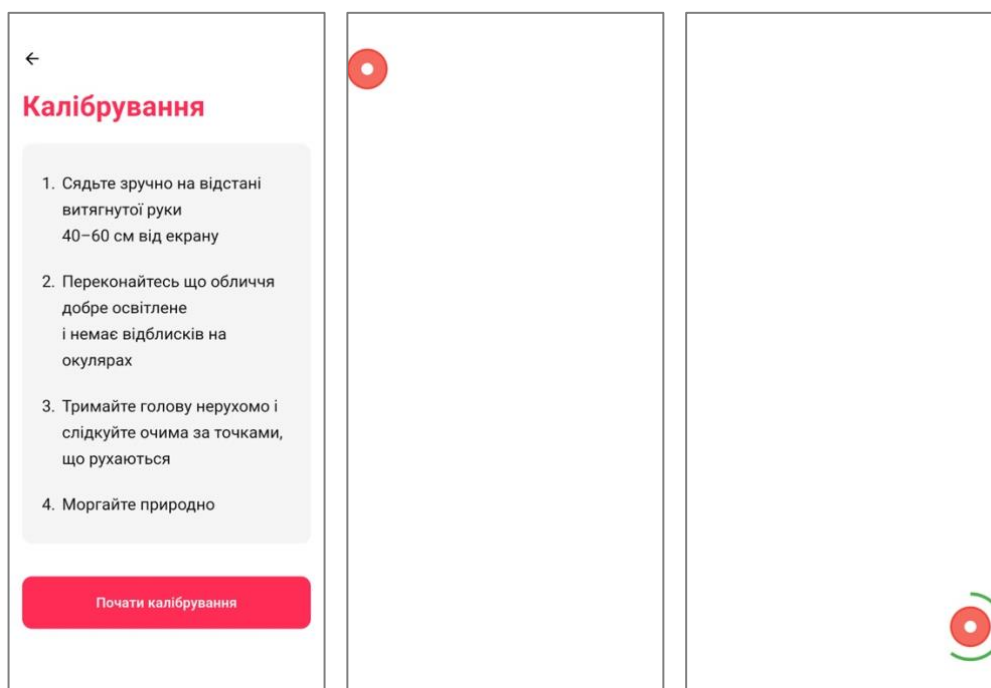


Рисунок Г.2 – Інструкції перед калібруванням і процес калібрування

Після успішного калібрування учасник переходить до списку трьох доступних експериментів (Рисунок Г.3).

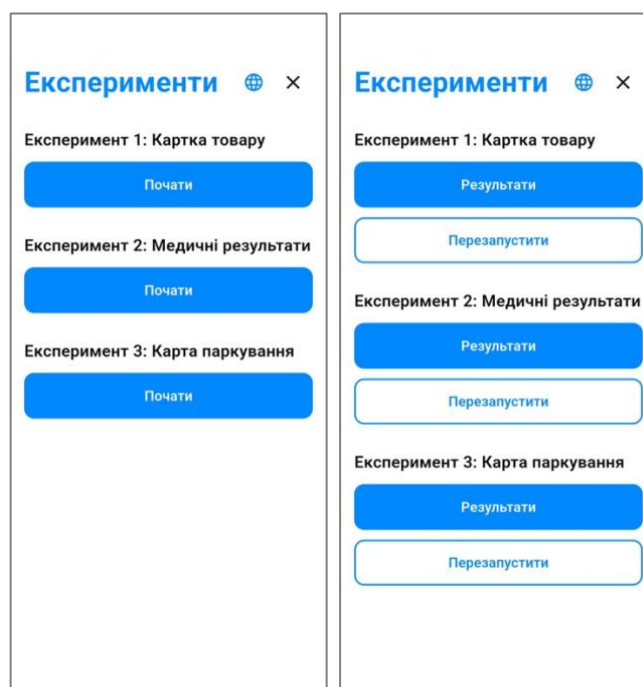


Рисунок Г.3 – Список трьох експериментів

Перед початком кожного експерименту учаснику показується коротка інструкція, що йому необхідно зробити під час експерименту (Рисунок Г.4).

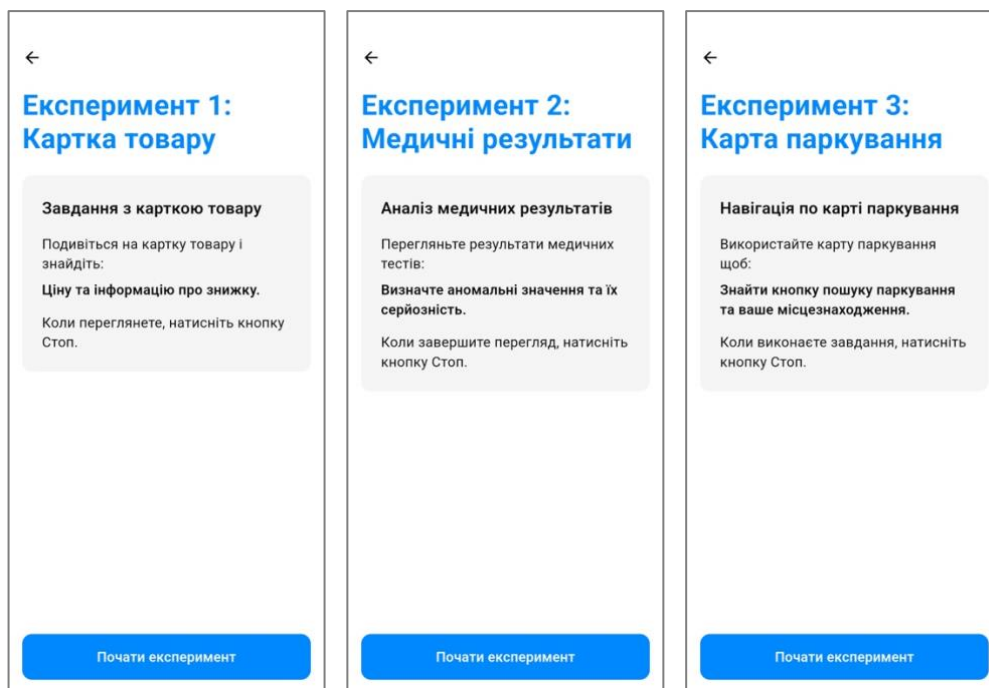


Рисунок Г.4 – Інструкції до експериментів

Під час перегляду стимульного зображення на екрані відображається мінімалістичний інтерфейс: повноекранне зображення стимулу та кнопка «Stop» у правому нижньому куті (Рисунок Г.5). Системний UI прихований через SystemUiMode.immersiveSticky для точності координат погляду.

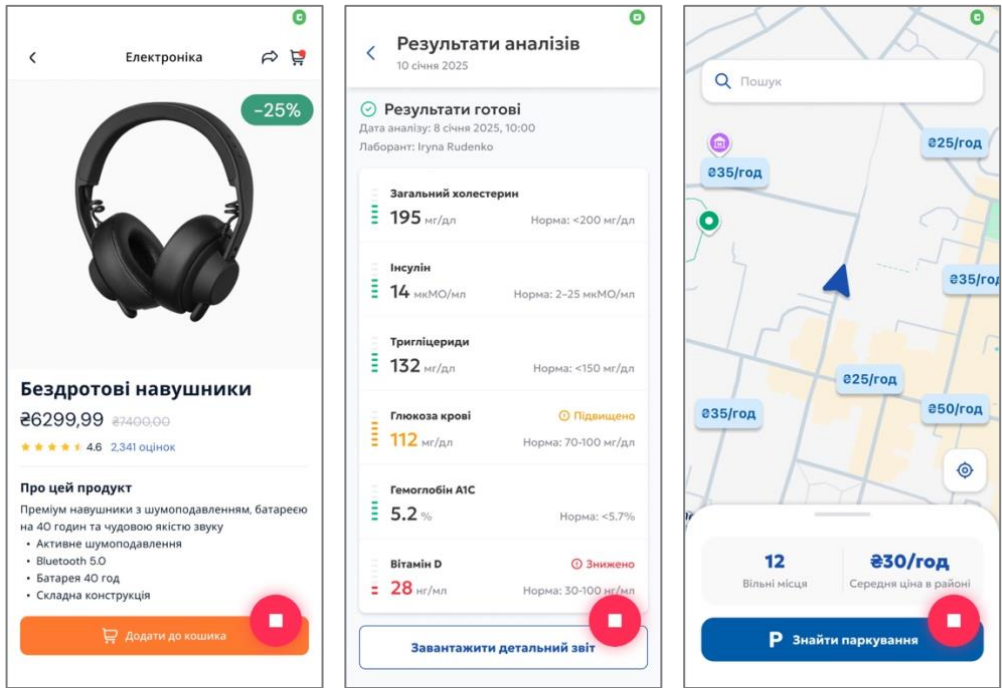


Рисунок Г.5 – Стимульні екрани експериментів

Після зупинки запису учасник переходить до екранів запитань, що стосуються стимульного екрану (Рисунок Г.6).

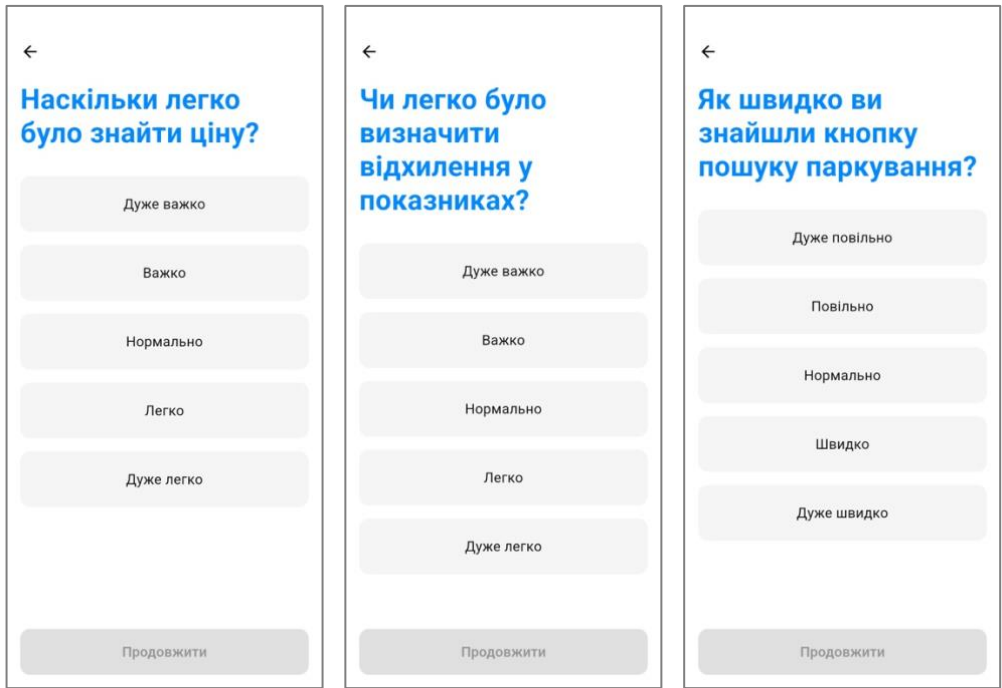


Рисунок Г.6 – Екрани запитань після експерименту

Після відповідей на запитання учасник переходить до екранів результатів, що містить чотири вкладки: Heatmap, Gaze-plot, Table та Answers. Завантаження до Firebase ініціюється кнопкою у правому верхньому куті (Рисунок Г.7).

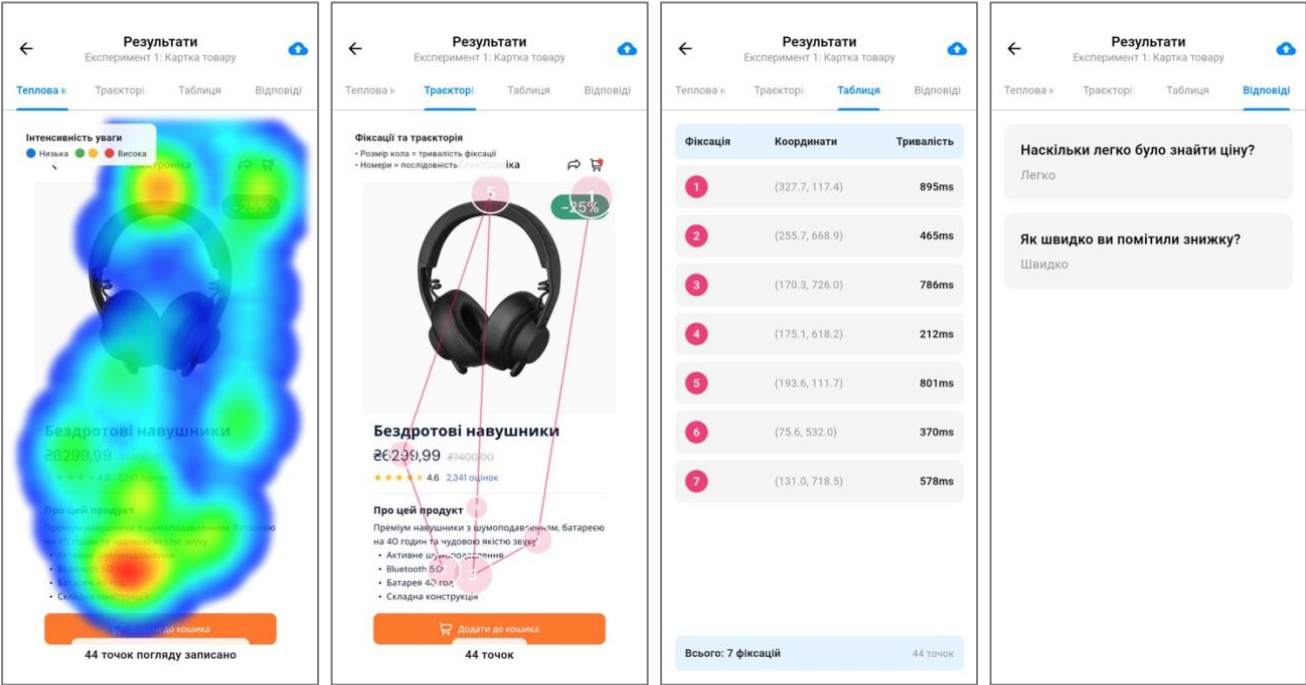


Рисунок Г.7 – Екрани результатів експериментів

Додаток Д. Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Reshetniak V., Faure E. Eye-tracking as a tool for researching user behavior. Computer-integrated technologies: education, science, production. 2024. № 55. С. 181–190. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-23>.

2. Reshetniak V., Faure E. Eye-Tracking in mobile applications: design optimization and user behavior analysis. *Sensors, devices and systems* / ред.: С. Bazilota ін. Cham, 2026. С. 374–383. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-032-18415-3_38. (Scopus).

3. Решетняк В., Фауре Е. Мобільний айтрекінг як інструмент виявлення відмінностей у розподілі візуальної уваги: роль віку та цифрової компетентності. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2026. Т. 1. С. 419–429. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-51>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Решетняк В. Сучасні технології та пристрої відслідковування погляду. Збірник тез доповідей Міжнар. наук.-практич. конфер. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій». Черкаси, 2022. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4353>.

2. Решетняк В., Фауре Е. Візуалізація результатів досліджень з відслідковування погляду. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційна безпека та комп’ютерні технології” до 30-ти річчя кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення: тези доповідей. Кропивницький, 2023. URL: <https://kntu.kr.ua/file/content/7710/zbirnyk-tez-kb2023.pdf>.