

УДК 004.418+004.738.52

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.21>

БАГАТОАГЕНТНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ДОСТУПНОСТІ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО КОНТЕНТУ

Титов П. О. – аспірант кафедри комп'ютерних наук

Сумського державного університету

ORCID ID: 0009-0002-2092-7463

Кузіков Б. О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук

Сумського державного університету

ORCID ID: 0000-0002-9511-5665

Scopus-Author ID: 55653809800

Researcher ID: AAS-7954-2020

Швидкі темпи цифрової трансформації та зростаюча роль вебтехнологій зумовлюють необхідність забезпечення рівного доступу до онлайн-ресурсів для всіх користувачів, включаючи людей з обмеженими можливостями. Незважаючи на наявність міжнародних стандартів і законодавчих актів, значна частина цифрового контенту залишається важкодоступною для певних категорій користувачів, що особливо критично у сфері освіти, де різноманітність форматів подання матеріалу є необхідною умовою ефективного навчання. У статті представлено розроблену багатоагентну інформаційну технологію, що дозволяє комплексно оцінювати доступність різних типів контенту: гіпертексту, PDF-документів та зображень. На відміну від існуючих рішень, які зазвичай обмежуються аналізом одного формату, запропонована технологія забезпечує уніфікований підхід до аналізу вебдоступності. Ключовими перевагами розробленої технології є: автоматизована перевірка відповідно до настанов WCAG, гнучка багатоагентна архітектура з можливістю динамічного підключення нових аналізаторів, консолідація результатів через уніфікований API та ефективне кешування результатів за хешем контенту. Архітектурне рішення базується на концепції незалежних агентів-аналізаторів, що дозволяє легко розширювати функціональність системи та адаптувати її під специфічні потреби без модифікації основного коду. Реалізований механізм асинхронної обробки забезпечує можливість паралельного аналізу різних аспектів доступності одного документу та зменшує час очікування результатів. Розроблений прототип використовує сучасні інструменти аналізу (Axe Core, Wave) з подальшою консолідацією результатів через уніфікований API. Окремо реалізовано оригінальні компоненти: аналізатор контрастності зображень на основі комп'ютерного зору, що враховує особливості сприйняття кольору людьми з різними видами дальтонізму, та модуль виявлення зловживань засобами доступності, який ідентифікує спроби маніпуляції контентом через ARIA-атрибути. Подальші дослідження спрямовані на розширення підтримуваних форматів документів (DOCX, PPTX, мультимедіа), інтеграцію з хмарними сервісами для покращення масштабованості та впровадження методів штучного інтелекту для аналізу семантичної доступності контенту. Планується також реалізація механізму планових перевірок та інтеграція з системами управління контентом для автоматизації процесу моніторингу доступності.

Ключові слова: веб-доступність, WCAG, багатоагентна інформаційна технологія, оцінка доступності веб-сайту, PDF, зображення, інклюзивний цифровий контент.

Tytov P. O., Kuzikov B. O. Multi-agent information technology for assessing the accessibility of multimodal content

The rapid pace of digital transformation and the growing role of web technologies in the modern world necessitate ensuring equal access to online resources for all users, including people with disabilities. Despite the availability of international standards and legislation, a significant portion of digital content remains difficult to access for certain categories of users. This creates a digital barrier and hinders the full participation of people with special needs in online activities – from using public services to obtaining education and employment. As one of the ways to solve this problem, innovative multi-agent information technology is proposed,

which allows us to comprehensively assess the accessibility of various types of web content: sites, PDF documents and images. Unlike existing solutions, which are often limited to only one format, the technology provides a unified approach to analyzing web accessibility. The key advantages of the proposed technology are automation of the verification process in accordance with WCAG, parallel processing of requests due to multi-agent architecture, user-friendly interface and integration with a database to minimize repeated checks. The approach is based on the use of several existing tools with subsequent consolidation and harmonization of results. The modular structure of the system and the use of modern libraries allow scaling the solution and expanding its functionality. The proposed approach can significantly reduce the time and resources for checking web accessibility, which is especially important for large web resources with a significant amount of content. The implementation of the proposed multi-agent system will enhance digital accessibility, ensuring that users with different types of impairment can effectively access and interact with web content. Future research will focus on enhancing the system's capabilities, extending support for additional document formats, integrating with cloud services, and leveraging artificial intelligence techniques to further improve the accessibility evaluation process.

Key words: web accessibility, WCAG, multi-agent information technology, website accessibility evaluation, PDF, images, inclusive digital content.

Вступ. Доступність цифрового контенту є фундаментальною вимогою сучасного інформаційного суспільства, що забезпечує рівні можливості взаємодії з електронними ресурсами для всіх категорій користувачів. Ця вимога закріплена на законодавчому рівні багатьма країнами та міжнародними організаціями. Зокрема, в Україні впроваджено Закон «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо забезпечення доступу осіб з особливими освітніми потребами до освітніх послуг» [1], що регламентує вимоги до інклюзивності освітніх ресурсів. На міжнародному рівні варто відзначити Директиву Європейського Союзу (EU) 2016/2102 щодо доступності вебсайтів та мобільних додатків органів державного сектору [2], яка встановлює єдині стандарти для країн-членів ЄС. Технічні аспекти забезпечення доступності регулюються низкою міжнародних стандартів, серед яких Section 508 [3] та EN 301 549 [4]. Проте найбільш комплексним і широко визнаним є стандарт Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) [5], розроблений консорціумом W3C. WCAG пропонує детальні рекомендації щодо створення доступного вебконтенту та критерії оцінки його відповідності вимогам інклюзивності.

Незважаючи на наявність нормативної бази та технічних стандартів, дослідження [6-8] демонструють, що значна частина цифрового простору досі залишається розробленою без урахування вимог щодо доступності. Це створює суттєві бар'єри у доступі до інформації, освіти та державних послуг для мільйонів людей. Основними факторами такої ситуації є недостатня обізнаність розробників щодо принципів доступності та відсутність систематичного моніторингу відповідності вебресурсів встановленим вимогам.

Для автоматизованої оцінки відповідності вебконтенту вимогам доступності розроблено широкий спектр програмних рішень. Серед найбільш поширених інструментів варто відзначити AXE [9] та WAVE [10], які, згідно з дослідженнями [11], здатні автоматично виявляти до 57% порушень вимог WCAG. Ці інструменти представлені як у вигляді комерційних продуктів, так і рішень з відкритим кодом, що робить їх доступними для різних категорій користувачів – від індивідуальних розробників до великих організацій.

Сучасні тенденції розвитку інструментів оцінки доступності характеризуються активним впровадженням технологій штучного інтелекту [12, 13]. Застосування методів машинного навчання та нейронних мереж дозволяє оптимізувати процес аналізу, суттєво скорочуючи час, необхідний для експертної оцінки, підвищувати

точність аналізу та генерувати рекомендовані оновлення. Проте, незважаючи на значний прогрес у розвитку автоматизованих засобів аналізу, повна автоматизація процесу оцінки доступності залишається складним завданням, що потребує подальших досліджень.

Особливої уваги в контексті забезпечення доступності потребують освітні ресурси, що характеризуються різноманітністю форматів подання навчального матеріалу: гіпертекст, зображення, мультимедійний контент та документи різних типів. Аналіз існуючих рішень для оцінки доступності демонструє їх спеціалізацію за окремими типами контенту:

- для вебсайтів – Axe та Wave;
- для PDF-документів – Axes PDF [14] та CommonLook PDF Validator [15];
- для документів формату DOCX – вбудований інструмент перевірки доступності Microsoft Office [16];
- для документів формату ODT – LibreOffice Accessibility Checker [17].

Така спеціалізація створює протиріччя між високою якістю аналізу окремих форматів та неможливістю комплексної оцінки освітнього контенту, що зазвичай поєднує різні модальності подання інформації. Більше того, навіть у межах однієї модальності різні інструменти використовують відмінні набори правил перевірки, покриваючи різні аспекти доступності контенту. Розробка нових універсальних аналізаторів, здатних обробляти всі типи контенту, потребує значних ресурсів та часу на реалізацію.

Виявлені обмеження існуючих рішень обґрунтовують необхідність розробки нової багатоагентної інформаційної технології для комплексної оцінки доступності цифрового контенту. Запропонована технологія базується на концепції програмних агентів, кожен з яких інкапсулює окремий інструмент аналізу доступності та забезпечує уніфікацію його інтерфейсу взаємодії з системою. Такий підхід створює можливість інтеграції існуючих спеціалізованих засобів аналізу в єдину систему, забезпечує масштабованість рішення через можливість додавання нових агентів та дозволяє автоматизувати процес комплексної оцінки доступності різних типів контенту.

Метою даного дослідження є розробка та обґрунтування архітектури багатоагентної інформаційної технології для оцінки доступності мультимодального контенту. Важливим аспектом дослідження є визначення функціональних можливостей та потенційних обмежень запропонованого рішення.

Методи. На основі проведеного аналізу літературних джерел та існуючих програмних рішень було сформульовано ключові концептуальні засади розробки багатоагентної інформаційної технології оцінки доступності. Чотири ключові принципи, покладені в основу розробки:

1. Повністю автоматизована обробка не можлива. Тому ширша обізнаність у проблематиці цифрової доступності є набагато важливішою за глибину аналізу окремого ресурсу.

2. Максимальне використання існуючого інструментарію замість розробки дублюючих рішень. Створення спеціалізованих інструментів, таких як та WAVE [9] та AXE Core [10], потребувало значних ресурсів та багаторічних зусиль спільноти. Тож вони мають бути максимально використані без розробки засобів, що дублюють наявний функціонал.

3. Комплементарність існуючих інструментів аналізу. Спектр аналізу наявних засобів суттєво перетинається, але перетин не є повним. Поєднання кількох засобів для аналізу одного ресурсу може дати кращий результат, ніж вдосконалення одного.

4. Регулярний моніторинг і підтримка показників доступності на постійній основі важливіші за разове «наведення ладу».

Враховуючи визначені концептуальні засади, було сформульовано наступні вимоги до програмного продукту:

1. Простота початку роботи – можливість використання без встановлення додаткового програмного забезпечення, із мінімальними витратами часу на початок роботи.

2. Зрозумілість результатів – система повинна надавати чіткий звіт із конкретними рекомендаціями щодо покращення доступності.

3. Гнучке планування – можливість налаштування автоматизованої обробки зразків, включаючи обробку за розкладом. При цьому прийняття рішень щодо подальших дій залишається за розробником.

4. Ресурсна ефективність – система повинна оптимально використовувати обчислювальні ресурси при здійсненні повторних перевірок.

5. Інтеграція існуючих засобів – широке застосування наявних інструментів аналізу відповідно до типу контенту, що ними підтримується.

6. Розширюваність – легке управління засобами аналізу (версіонування, оновлення, додавання, вимкнення) без необхідності зміни програмного коду продукту.

7. Універсальність – підтримка широкого кола типів контенту для перевірки.

8. Урахування авторських прав на контент і використання об'єктів не довше ніж це потрібно для цілей обробки.

Визначені концептуальні засади та сформульовані на їх основі вимоги забезпечують теоретичне та практичне підґрунтя для розробки ефективної багатоагентної технології оцінки доступності мультимодального контенту.

При розробці архітектури системи було враховано досвід існуючих агрегаторів аналітичних сервісів, зокрема платформи VirusTotal [18]. Цей сервіс демонструє ефективність підходу, що базується на інтеграції множини спеціалізованих інструментів аналізу для отримання комплексної оцінки. Архітектурні рішення VirusTotal, такі як єдиний API для доступу до різних аналізаторів, система кешування результатів та механізми агрегації висновків від різних інструментів, були адаптовані для задач оцінки доступності контенту. З архітектури VirusTotal були запозичені та адаптовані такі ключові принципи:

- Використання уніфікованого інтерфейсу для подання контенту на аналіз, що забезпечує незалежність від конкретних інструментів перевірки.

- Збереження результатів аналізу в кеші для мінімізації повторних перевірок незмінного контенту, що суттєво підвищує ефективність роботи системи.

- Агрегація та нормалізація результатів від різних інструментів аналізу з метою формування уніфікованого консолідованого звіту.

На основі сформульованих вимог та з урахуванням досвіду платформи VirusTotal було розроблено трирівневу архітектуру системи. В ній явно виділено такі компоненти:

- клієнтська частина, що забезпечує взаємодію з користувачем;
- серверна частина для координації процесів аналізу та управління даними;
- менеджер фонових задач, який запускає спеціалізовані агенти із актуального переліку на основі ресурсних обмежень та визначеного типу контенту.

Запропоновану архітектуру представлено на рисунку 1.

Розроблена архітектура визначає чотири основні етапи обробки запитів на аналіз доступності контенту (див. рис. 2).

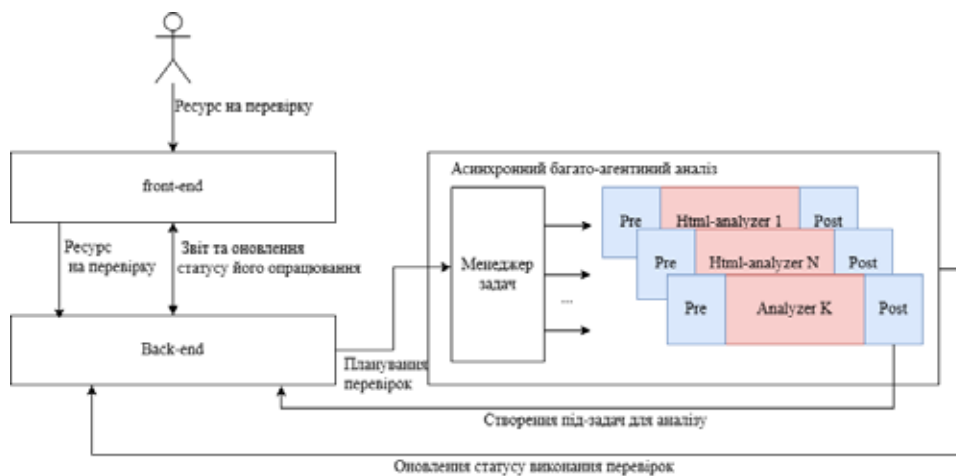


Рис. 1. Принципова схема інформаційної технології

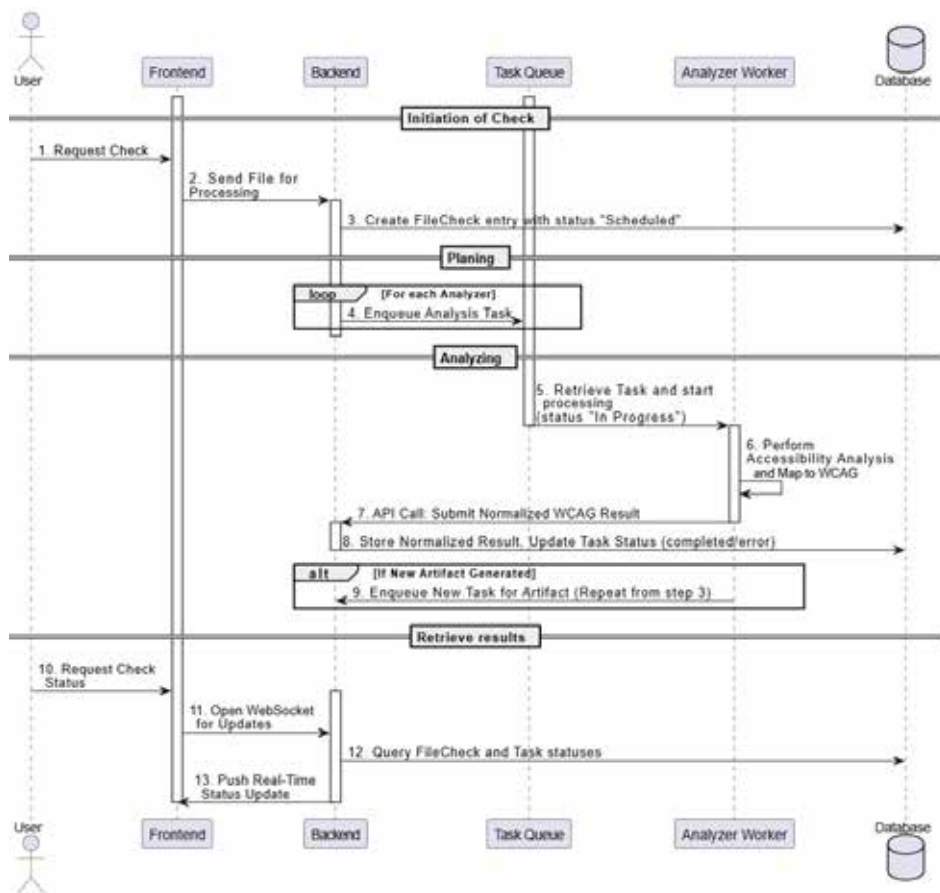


Рис. 2. Діаграма послідовностей аналізу документів

Процес починається з визначення типу об'єкту та створення завдання на його обробку. Цей етап є критичним для подальшого відслідковування статусу перевірки та забезпечує можливість порівняння результатів аналізу різними версіями аналізаторів у майбутньому. На основі визначеного типу контенту серверна частина ініціює розміщення відповідних задач у менеджері фонових процесів Celery.

На етапі безпосереднього аналізу система гнучко розподіляє навантаження між доступними агентами. В залежності від наявних ресурсів і конфігурації може запускатись один чи декілька агентів одночасно. Celery дозволяє використовувати для запуску задач різні хости, що знижує навантаження на центральний вузол. Кожен агент отримує посилання на контент для аналізу та URI-адресу для реєстрації результату. Основною задачею агента є запуск відповідного аналізатора у притаманному йому стилі (як процес чи через web-API), передача параметрів та приведення результатів до уніфікованого формату відповідно до настанов WCAG (етап «Map to WCAG»).

Хоча, згідно з практикою експлуатації розподілених систем [19], такий «мікросервісний» підхід не завжди ефективний при аналізі великих об'єктів кількома аналізаторами, для нашого випадку він цілком виправданий, оскільки розмір більшості об'єктів не перевищує кількох мегабайт.

Результати аналізу передаються на спеціальний URI серверної частини, що забезпечує повну ізоляцію серверу та бази даних від сервісів перевірки. На фінальному етапі отримані дані узагальнюються, гармонізуються та передаються клієнту через WebSocket-з'єднання.

Технічна реалізація системи базується на сучасному стеку технологій, що забезпечує надійність, масштабованість та зручність розробки. Клієнтська частина реалізована на базі фреймворку Angular, що дозволяє створювати складні односторінкові додатки (Single Page Applications, SPA) з використанням компонентного підходу та TypeScript. Вибір Angular обґрунтований його зрілістю, потужною екосистемою. Для побудови користувацького інтерфейсу застосовано бібліотеку Angular Material, яка надає набір готових компонентів, що відповідають принципам Material Design та мають вбудовану підтримку доступності. Використання RxJS забезпечує ефективну обробку асинхронних подій та потоків даних, що особливо важливо для плавної роботи інтерфейсу під час тривалих операцій аналізу доступності.

Серверна частина системи розроблена з використанням Python та мікрофреймворку Flask, що забезпечує гнучкість у побудові REST API та можливість легкого масштабування. Вибір Python зумовлений багатою екосистемою бібліотек для аналізу даних та машинного навчання, що може бути корисним для подальшого розвитку системи. Архітектура серверної частини побудована за принципами REST, що забезпечує чітке розділення відповідальності та можливість незалежного масштабування компонентів. Для забезпечення надійної роботи з даними використовується ряд спеціалізованих бібліотек, зокрема HashData для генерації унікальних ідентифікаторів контенту та requests для взаємодії з зовнішніми API аналізаторів.

Схема бази даних, представлена на рисунку 3. Центральними сутностями моделі виступають:

- File – сутність, що представляє файл, який підлягає аналізу доступності. Унікальна ідентифікація файлу здійснюється за допомогою криптографічного хешу SHA-256 його вмісту, що дозволяє уникнути повторної обробки ідентичних файлів. Фізичне зберігання контенту реалізовано в приватному Amazon S3-бакеті, причому термін зберігання обмежується часом, необхідним для завершення

аналізу, що забезпечує оптимальне використання ресурсів та відповідність вимогам захисту даних.

- FileCheck – сутність, що відображає окрему ітерацію перевірки файлу на доступність. Реалізація підтримує множинні перевірки одного файлу, що необхідно для випадків повторного аналізу або планових перевірок. Варіативність результатів між перевірками може бути зумовлена оновленням версій аналізаторів або зміною конфігурації доступних агентів системи.

- Процес аналізу починається з отримання переліку доступних агентів з таблиці Analyzer, де агенти фільтруються за підтримуваними MIME-типами контенту (зв'язок реалізовано через таблицю SupportedTypes). Такий підхід забезпечує гнучкість у розширенні функціональності системи та додаванні нових типів контенту для аналізу.

- Для кожного відібраного агента створюється окрема задача на аналіз (таблиця AnalystTask). Результати виконання цих задач зберігаються в таблиці Result, при цьому модель даних передбачає можливість отримання від одного аналізатора множини результатів різних типів, що відповідає різноманітності аспектів доступності, які можуть бути виявлені під час аналізу.

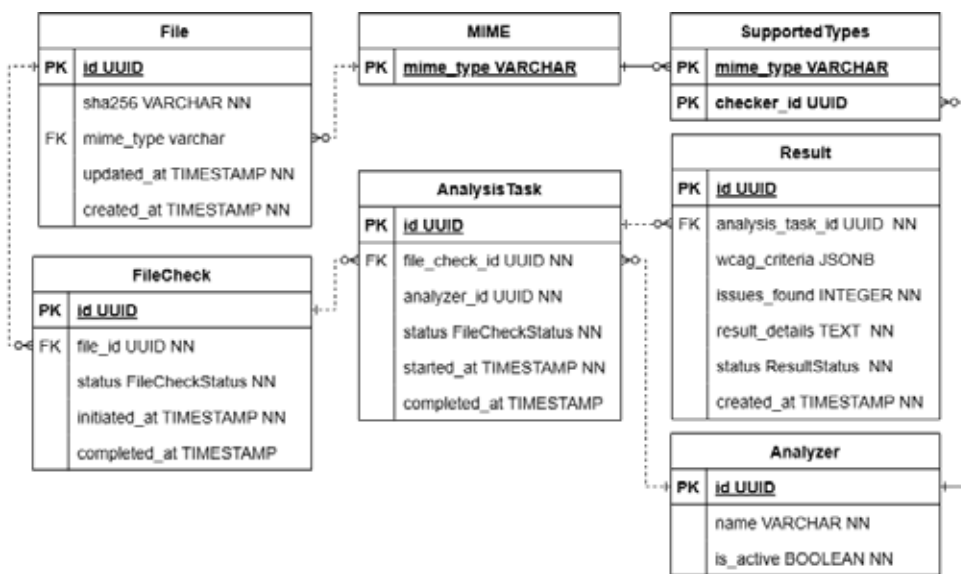


Рис. 3. Схема бази даних

У поточній реалізації багатоагентної системи функціонують шість спеціалізованих агентів: три агенти аналізу гіпертекстового контенту, що базуються на інструментах Axe Core, Wave та Website Accessibility Checker; агент аналізу PDF-документів на основі Adobe Auto-Tag; агент аналізу контрастності зображень (власна розробка); та агент виявлення потенційних зловживань засобами доступності (Accessibility Cloaking Attacks).

Сервіс перевірки зображень базується на виявленні тексту в зображеннях та аналізі контрастності кольорів тексту та фону, для визначення їх контрастності. Вадою більшості сучасних аналізаторів доступності є неможливість визначення

контрастності для зображень із нерівномірним фоном. Сервіс розроблено із метою розширити перевірки контрастності на цей випадок. Також, додатково враховуються можливі вади кольоросприяття (протанопія, дейтеранопія тощо). Роботу агента побудовано на бібліотеці OpenCV.

В рамках виконання науково-дослідної роботи «Інтелектуальні технології в кібербезпеці» (НДДКР № 0121U09466) розроблено інноваційний агент виявлення зловживань засобами доступності. Цей компонент спрямований на виявлення потенційних атак типу «accessibility cloaking», коли зловмисники використовують семантичну розбіжність між візуальним контентом та його представленням через допоміжні технології (наприклад, ARIA-мітки та екранні читачі). Для практичної реалізації цієї функціональності було розширено базовий функціонал аналізатора Axe Core додатковими правилами перевірки семантичної узгодженості контенту.

Приклад роботи інструменту представлено на рисунках 4 а,б.

Обговорення. Розроблена багатоагентна інформаційна технологія демонструє суттєві переваги у порівнянні з існуючими рішеннями для оцінки доступності цифрового контенту. Основною відмінністю запропонованого підходу є комплексність аналізу різних типів контенту відповідно до настанов WCAG 2.1, що досягається завдяки інтеграції спеціалізованих інструментів у єдину систему.

Ключовою інновацією розробленої технології є універсальність підходу до аналізу доступності. На відміну від існуючих рішень, які зазвичай спеціалізуються на окремих форматах контенту, запропонована система забезпечує уніфікований аналіз трьох основних категорій цифрового контенту: вебсторінок, PDF-документів та зображень. Така інтеграція досягається завдяки використанню спеціалізованих агентів на основі Wave, Axe Core та Adobe Auto-Tag для аналізу HTML та PDF, а також власного рішення на базі OpenCV для оцінки доступності зображень.

Використання багатоагентної архітектури забезпечує ряд технічних переваг. По-перше, це дозволяє здійснювати паралельну обробку контенту різними аналізаторами, що суттєво прискорює процес перевірки для великих обсягів даних. По-друге, модульна структура спрощує інтеграцію нових агентів та масштабування системи відповідно до потреб користувачів. Додатково, реалізований механізм кешування результатів дозволяє уникнути повторного аналізу незмінних елементів контенту, що оптимізує використання обчислювальних ресурсів.

Важливим аспектом розробленої технології є повна автоматизація процесу оцінки доступності. Це суттєво знижує часові витрати для розробників та власників контенту порівняно з ручним аналізом. При цьому система не лише виявляє проблеми, але й надає конкретні рекомендації щодо їх усунення відповідно до вимог WCAG 2.1.

Результати практичного застосування системи демонструють її ефективність у виявленні проблем доступності різних типів контенту. Зокрема, інтеграція кількох спеціалізованих аналізаторів дозволяє досягти більш повного покриття потенційних проблем порівняно з використанням окремих інструментів. Наприклад, при аналізі вебсторінок комбінація Wave та Axe Core забезпечує виявлення як структурних проблем доступності, так і специфічних випадків невідповідності стандартам WCAG.

Попри значні переваги запропонованого рішення, важливо відзначити наявні обмеження системи. Основним з них є те, що програма здатна виявляти проблеми доступності, але не може забезпечити їх автоматичне виправлення – певні недоліки, як-от відсутність альтернативного тексту для зображень чи некоректна семантична структура документа, потребують експертного втручання для якісної корекції.

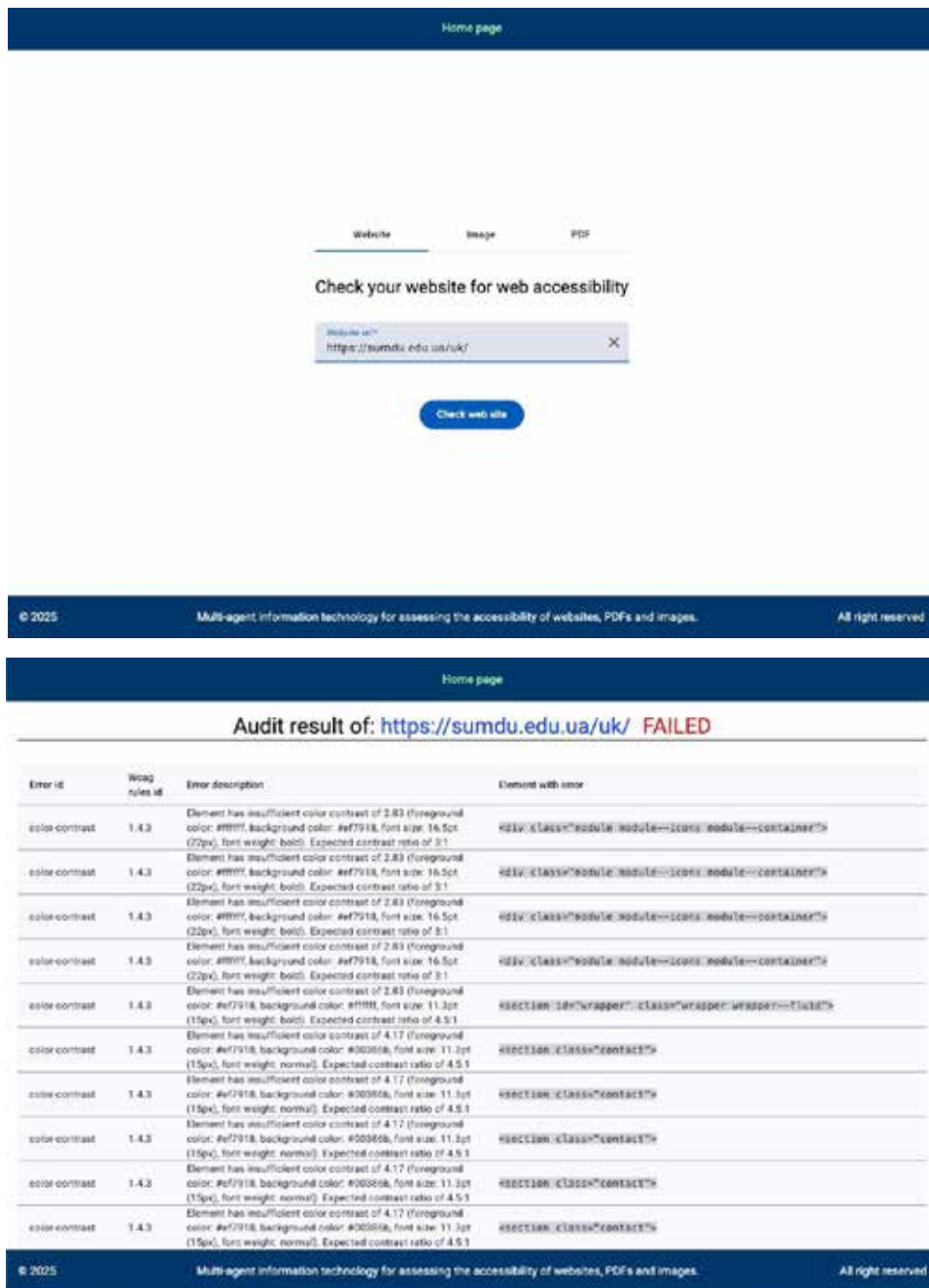


Рис. 4. Приклади використання інструменту
а) головна сторінка б) звіт по результатам аналізу

Варто зазначити, що сучасні дослідження у сфері штучного інтелекту пропонують інструменти для автоматичної адаптації контенту [20]. Однак використання таких засобів може суперечити одній з ключових цілей проєкту – підвищенню обізнаності розробників щодо принципів доступності. Автоматична корекція, хоч і є технічно можливою, може призвести до формального дотримання вимог без розуміння засадничих принципів доступності.

На поточному етапі розроблену систему доцільно розглядати як прототип, що демонструє життєздатність запропонованого підходу. Подальший розвиток проєкту передбачає декілька стратегічних напрямків удосконалення:

- Основною метою проєкту залишається просвітницька складова, тому постійне вдосконалення якості та інформативності звітів є пріоритетним завданням. Особлива увага приділяється розширенню пояснювальної частини та впровадженню інтерактивних елементів для кращого розуміння виявлених проблем.

- Наступним важливим напрямком є розширення підтримки форматів контенту, зокрема включення можливості аналізу документів Microsoft Office (DOCX), презентацій (PPTX), а також відео- та аудіоматеріалів. Архітектура системи передбачає інтеграцію нових аналізаторів без модифікації базового коду, хоча певні складнощі виникають на етапі пошуку та адаптації відповідних інструментів аналізу.

- Суттєвим технічним завданням є вдосконалення можливостей масштабування системи через спрощення процесу додавання нових агентів та керування їх кількістю. Для підвищення надійності та безпеки окремих вузлів планується міграція з Celery на архітектуру з використанням черг повідомлень (зокрема, на базі Amazon SQS). Така модифікація потребує змін у серверній частині системи, проте код агентів залишиться практично незмінним.

- У поточній версії системи процес визначення типу контенту потребує попереднього завантаження файлів на сервер з подальшим переміщенням даних до Amazon S3 для тимчасового зберігання під час аналізу. Це створює додаткове навантаження на дискову підсистему та обчислювальні ресурси серверної частини. Для оптимізації цього процесу розглядається впровадження прямого завантаження на S3 з асинхронним визначенням типу контенту за допомогою AWS Lambda.

- Особливу увагу планується приділити реалізації механізму рекурсивного аналізу пов'язаних ресурсів, що уможливить автоматичне виявлення та перевірку всіх компонентів складних цифрових об'єктів. Технічна можливість такого розширення передбачена в поточній архітектурі, що відображено в діаграмі послідовностей (див. рис. 2, крок 9).

Хоча окреслені напрямки вдосконалення не є критичними для початкового етапу експлуатації системи, їх реалізація дозволить істотно розширити можливості платформи та підвищити її ефективність у досягненні основної мети – сприяння створенню більш доступного цифрового простору.

Висновки. Реалізація багатоагентної інформаційної технології оцінки доступності мультимодального контенту демонструє наступні ключові результати:

1. Створено архітектуру багатоагентної системи, що забезпечує комплексний аналіз доступності різних типів цифрового контенту (вебсайти, PDF-документи, зображення) через уніфікований інтерфейс. Модульна структура системи дозволяє динамічно інтегрувати нові аналізатори без модифікації базового коду.

2. Реалізовано механізм асинхронної обробки контенту, що забезпечує паралельне виконання перевірок різними агентами та оптимізує використання

обчислювальних ресурсів. Впроваджена система кешування на основі хешування контенту дозволила уникнути надлишкових повторних перевірок.

3. Створено оригінальні компоненти системи: аналізатор контрастності зображень з урахуванням особливостей сприйняття кольору та модуль виявлення зловживань засобами доступності, що розширюють можливості існуючих інструментів аналізу.

Подальший розвиток технології спрямований на підтримку додаткових форматів контенту (DOCX, PPTX, мультимедіа), покращення механізмів масштабування та впровадження методів машинного навчання для підвищення точності аналізу семантичної доступності. Запропоновані архітектурні рішення та реалізовані компоненти системи забезпечують надійну платформу для створення більш інклюзивного цифрового простору.

Робота виконана в рамках дослідницького проєкту «Інтелектуальні технології в кібербезпеці» (Державний реєстраційний номер 0121U109466, Міністерство освіти і науки України).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо доступу осіб з особливими освітніми потребами до освітніх послуг : Закон України від 06.09.2018 № 2541-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2541-19> (дата звернення: 09.02.2025).
2. Directive (EU) 2016/2102 on the accessibility of the websites and mobile applications of public sector bodies. *Official Journal L*. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L2102&rid=1>.
3. Guide accessible web design development. *Section508.gov*. URL: <https://www.section508.gov/content/guide-accessible-web-design-development/> (date of access: 10.02.2025).
4. ETSI. EN 301 549 V3.2.1: Accessibility requirements for ICT products and services. European Telecommunications Standards Institute, 2021. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301549/03.02.01_60/en_301549v030201p.pdf.
5. Web content accessibility guidelines (WCAG) 2.1. *W3C*. URL: <https://www.w3.org/TR/WCAG21/> (date of access: 10.02.2025).
6. Титов П. О., Кузіков Б. О. Інформаційна технологія оцінки доступності веб-ресурсів для осіб із особливостями зору. *Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в культурі, мистецтві, освіті, науці, економіці та бізнесі»*. Київ, 2024.
7. Alim S. Web accessibility of the top research-intensive universities in the UK. *SAGE open*. 2021. Vol. 11, no. 4. URL: <https://doi.org/10.1177/21582440211056614>.
8. Akgül Y. Accessibility, usability, quality performance, and readability evaluation of university websites of Turkey: a comparative study of state and private universities. *Universal access in the information society*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s10209-020-00715-w> (date of access: 10.02.2025).
9. WAVE web accessibility evaluation tools. *WAVE Web Accessibility Evaluation Tools*. URL: <https://wave.webaim.org/> (date of access: 10.02.2025).
10. Axe: accessibility testing tools and software. *Deque*. URL: <https://www.deque.com/axe/> (date of access: 10.02.2025).
11. Automated testing identifies 57% digital accessibility. *Deque*. URL: <https://www.deque.com/blog/automated-testing-study-identifies-57-percent-of-digital-accessibility-issues/> (date of access: 10.02.2025).
12. Kishore H. S., Solomon Paul Raj D., Senthilkumar K. R. AI for accessibility. *Advances in library and information science*. 2024. P. 214–225. URL: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5593-0.ch015> (date of access: 10.02.2025).

13. B G D., Sanjeet Kaur M., C A H. S. Towards inclusive multimedia accessibility: a synergy of artificial intelligence & machine learning technologies. *2023 fourth international conference on smart technologies in computing, electrical and electronics (ICSTCEE)*, Bengaluru, India, 8–9 December 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icstcee60504.2023.10584968> (date of access: 10.02.2025).
14. Axes PDF. *Dienste der TU.it-Personendatenbank*. URL: <https://oase.it.tuwien.ac.at/21483445.asHTML> (date of access: 10.02.2025).
15. CommonLook PDF validator: PDF accessibility checker | FREE download. *Allyant – Simple. Seamless. Accessibility*. URL: <https://allyant.com/commonlook-accessibility-suite/cl-pdf-validator/> (date of access: 10.02.2025).
16. Improve accessibility with the accessibility checker – microsoft support. *Microsoft Support*. URL: <https://support.microsoft.com/en-gb/office/improve-accessibility-with-the-accessibility-checker-a16f6de0-2f39-4a2b-8bd8-5ad801426c7f> (date of access: 10.02.2025).
17. Accessibility. *LibreOffice*. URL: <https://www.libreoffice.org/get-help/accessibility/> (date of access: 10.02.2025).
18. How it works. *VirusTotal*. URL: <https://docs.virustotal.com/docs/how-it-works> (date of access: 10.02.2025).
19. Kolny M. Scaling up the Prime Video audio/video monitoring service and reducing costs by 90%. *Prime Video Tech*. URL: <https://web.archive.org/web/20230323220106/https://www.primevideotech.com/video-streaming/scaling-up-the-prime-video-audio-video-monitoring-service-and-reducing-costs-by-90> (date of access: 10.02.2025).
20. Web accessibility solution for ADA compliance & WCAG. *accessiBe*. URL: <https://accessibe.com/> (date of access: 10.02.2025).

REFERENCES:

1. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo dostupu osib z osoblyvymy osvitynymi potrebamy do osvitynykh posluh, Zakon Ukrainy № 2541-VIII (2018). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2541-19>
2. Directive (EU) 2016/2102 of the European Parliament and of the Council on the accessibility of the websites and mobile applications of public sector bodies. (2016). Official Journal L. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L2102>
3. Guide accessible web design development. Section508.gov. Retrieved February 10, 2025, from <https://www.section508.gov/content/guide-accessible-web-design-development/>
4. European Telecommunications Standards Institute. (2021). EN 301 549 V3.2.1: Accessibility requirements for ICT products and services. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301549/03.02.01_60/en_301549v030201p.pdf
5. World Wide Web Consortium. Web content accessibility guidelines (WCAG) 2.1. Retrieved February 10, 2025, from <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>
6. Tytov, P. O., & Kuzikov, B. O. (2024). Informatsiina tekhnolohiia otsinky dostupnosti veb-resursiv dlia osib iz osoblyvostiamy zoru [Information technology for assessing web resource accessibility for people with visual impairments]. In *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Informatsiini tekhnolohii v kulturi, mystetstvi, osviti, nautsi, ekonomitsi ta biznesi»*.
7. Alim, S. (2021). Web accessibility of the top research-intensive universities in the UK. *SAGE Open*, 11(4). <https://doi.org/10.1177/21582440211056614>
8. Akgül, Y. (2020). Accessibility, usability, quality performance, and readability evaluation of university websites of Turkey: A comparative study of state and private universities. *Universal Access in the Information Society*. <https://doi.org/10.1007/s10209-020-00715-w>
9. WebAIM. WAVE web accessibility evaluation tools. Retrieved February 10, 2025, from <https://wave.webaim.org/>

10. Deque Systems. Axe: Accessibility testing tools and software. Retrieved February 10, 2025, from <https://www.deque.com/axe/>
 11. Deque Systems. Automated testing identifies 57% digital accessibility. Retrieved February 10, 2025, from <https://www.deque.com/blog/automated-testing-study-identifies-57-percent-of-digital-accessibility-issues/>
 12. Kishore, H. S., Solomon Paul Raj, D., & Senthilkumar, K. R. (2024). AI for accessibility. In *Advances in library and information science* (pp. 214–225). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5593-0.ch015>
 13. B G, D., Sanjeet Kaur, M., & C A, H. S. (2023). Towards inclusive multimedia accessibility: A synergy of artificial intelligence & machine learning technologies. In *2023 Fourth International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icstcee60504.2023.10584968>
 14. Axes PDF. Retrieved February 10, 2025, from <https://oase.it.tuwien.ac.at/21483445.asHTML>
 15. Allyant. CommonLook PDF validator: PDF accessibility checker. Retrieved February 10, 2025, from <https://allyant.com/commonlook-accessibility-suite/cl-pdf-validator/>
 16. Microsoft. Improve accessibility with the accessibility checker. Retrieved February 10, 2025, from <https://support.microsoft.com/en-gb/office/improve-accessibility-with-the-accessibility-checker-a16f6de0-2f39-4a2b-8bd8-5ad801426c7f>
 17. The Document Foundation. Accessibility – LibreOffice. Retrieved February 10, 2025, from <https://www.libreoffice.org/get-help/accessibility/>
 18. VirusTotal. How it works. Retrieved February 10, 2025, from <https://docs.virustotal.com/docs/how-it-works>
 19. Kolny, M. (2023, March 22). Scaling up the Prime Video audio/video monitoring service and reducing costs by 90%. Prime Video Tech. <https://web.archive.org/web/20230323220106/https://www.primevideotech.com/video-streaming/scaling-up-the-prime-video-audio-video-monitoring-service-and-reducing-costs-by-90>
 20. accessiBe. Web accessibility solution for ADA compliance & WCAG. Retrieved February 10, 2025, from <https://accessibe.com/>
-