

Микола ЛУКАШУК,

orcid.org/0009-0009-5448-4315

аспірант кафедри дизайну і технологій

Київського національного університету культури і мистецтв

(Київ, Україна) mykola.lukashuk@gmail.com

ІЄРАРХІЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ ARIA АТРИБУТІВ У КОНТЕКСТІ УНІВЕРСАЛІЗАЦІЇ ДИЗАЙНУ ВЕБ-ІНТЕРФЕЙСІВ

У статті представлено результати створення ієрархічної класифікації ARIA-атрибутів, що забезпечує відповідність веб-інтерфейсів стандартам доступності, динамічну адаптацію до змін контексту та універсалізацію дизайну для інклюзивності.

У дослідженні використано ієрархічну класифікацію з кількома мітками (HMC) на основі графових нейронних мереж (GNN), де DOM (об'єктна модель документа) представлено у вигляді графа. Семантичні та структурні зв'язки моделювалися через поєднання вкладень текстових даних і структурних особливостей.

Запропонована методологія дозволила створити адаптивну класифікацію ARIA-атрибутів. DOM представлено як граф, у якому вузли відповідають HTML-елементам, а ребра відображають зв'язки, визначені ARIA. Семантичні та структурні зв'язки моделюються через поєднання вкладень, створених мовною моделлю BERT для текстових даних та Node2Vec для структурних особливостей. Індивідуальні функції втрат, включаючи перехресну ентропію, ієрархічні втрати та графову регуляризацію, забезпечують вирівнювання семантичного контексту й структурної логіки. Цей підхід покращує точність визначення доступності веб-компонентів за рахунок інтеграції семантичного значення та структурної узгодженості. Розроблена система дозволяє динамічно змінювати атрибути ARIA залежно від контексту, наприклад, адаптувати елементи div для створення доступних модальних діалогів. Завдяки цьому забезпечується реальна інтерактивність, підтримка оновлень у реальному часі та відповідність сучасним стандартам інклюзивного дизайну.

Уперше запропоновано підхід до ієрархічної класифікації ARIA-атрибутів із використанням графових нейронних мереж для динамічного управління доступністю веб-інтерфейсів у контексті їх універсалізації. Результати дослідження сприяють створенню інклюзивних веб-дизайнів, які динамічно адаптуються до потреб користувачів, що покращує доступність та користувацький досвід для ширшої аудиторії.

Ключові слова: *залежність «материнство-дочірність», HTML теги, функції втрат, веб-доступність, структурні взаємовідносини, елементи керування.*

Mykola LUKASHUK,

orcid.org/0009-0009-5448-4315

Postgraduate Student at the Department of Design and Technology

Kyiv National University of Culture and Arts

(Kyiv, Ukraine) mykola.lukashuk@gmail.com

HIERARCHICAL CLASSIFICATION OF ARIA ATTRIBUTES IN THE CONTEXT OF WEB INTERFACE DESIGN UNIVERSALIZATION

The research aims to develop a hierarchical classification of ARIA attributes to ensure web interfaces comply with accessibility standards, dynamically adapt to context changes, and universalize design for inclusivity.

The study employed hierarchical multi-label classification (HMC) based on graph neural networks (GNN), representing the Document Object Model (DOM) as a graph. Semantic and structural relationships were modeled by combining text embeddings and structural features.

The proposed methodology enabled the creation of an adaptive classification of ARIA attributes. The DOM was represented as a graph where nodes corresponded to HTML elements, and edges reflected relationships defined by ARIA. Semantic and structural links were modeled by combining embeddings generated by the BERT language model for textual data and Node2Vec for structural features. Individual loss functions, including cross-entropy, hierarchical losses, and graph regularization, ensured alignment between semantic context and structural logic. This approach improves the accuracy of identifying the accessibility of web components by integrating semantic meaning and structural consistency. The developed system allows dynamic adaptation of ARIA attributes based on context, such as modifying div elements to create accessible modal dialogs. This ensures real interactivity, support for real-time updates, and compliance with modern inclusive design standards.

For the first time, a hierarchical classification approach for ARIA attributes using graph neural networks has been proposed for dynamic management of web interface accessibility in the context of universalization. The research results

contribute to creating inclusive web designs that dynamically adapt to user needs, enhancing accessibility and user experience for a broader audience.

Key words: «parent-child» dependency, HTML tags, loss functions, web accessibility, structural relationships, controls.

Постановка проблеми. Розробка веб-інтерфейсів, структура яких відповідає стандартам веб-доступності вимагає застосування підходу, який забезпечуватиме інклюзивний дизайн у відповідь на варіативні переваги користувачів та вимоги різних платформ. Методологія має видалити розрив між поточними стандартами веб-доступності та динамічними контентними фреймворками, уможливаючи здійснення універсалізації інтерфейсів, вирішуючи проблеми комплексності, притаманні їхній структурі.

ARIA атрибути відіграють важливу роль у контексті універсалізації дизайну веб-інтерфейсів. Проте, комплексність цих атрибутів лежить у їх ієрархічній структурі та контекстних залежностях. Будучи глибоко взаємопов'язаними, дані атрибути регулюються правилами, які вимагають відповідності як семантичним ієрархіям так і динамічним взаємовідносинам в межах DOM.

Традиційні методи пласкої класифікації часто не здатні зафіксувати дані залежності, що у кінцевому випадку призводить до помилок. Порушення класифікації, або неповні ARIA анотації створюють основу для неможливості комфортного використання інтерфейсу різними групами користувачів. НМС пропонує потенціальне структуроване рішення даних проблем, забезпечуючи моделювання ієрархічних взаємозалежностей між ARIA атрибутами.

Аналіз досліджень. У роботі Чжоу К., Рень Л., Чжан Т. розглядаються проблеми створення адаптованих і придатних для використання веб-інтерфейсів для різноманітних комп'ютерних пристроїв, від настільних комп'ютерів до портативних пристроїв, таких як смартфони та КПК (Zhou et al., 2018). Зі зростаючим розмаїттям характеристик пристроїв, таких як розмір екрана, режими введення та можливості обробки, розробники інтерфейсу користувача стикаються зі зростаючою складністю забезпечення узгодженого та доступного дизайну. У цьому дослідженні пропонується гнучка авторська методологія, яка підтримує незалежність від пристрою шляхом поєднання сильних сторін кількох і єдиних авторських методів (Zhou et al., 2018).

Стратегія передбачає визначення обмежень, що стосуються окремих пристроїв, аналіз контекстів використання та розробку прототипів для найбільш обмежених пристроїв. Завдяки визна-

ченню пріоритетів обмежень цих пристроїв методологія гарантує, що інтерфейси можна адаптувати до більш широкого спектру платформ. Ключові кроки включають розробку загального набору вимог до дизайну на основі початкових прототипів і автоматизованих перетворень для адаптації до різноманітних можливостей різних пристроїв.

Методологія була випробувана в тематичному дослідженні, спрямованому на розробку доступних електронних послуг для членів Грецької асоціації сліпих із залученням як настільних браузерів, так і мобільних пристроїв. Прототипи оцінювали за допомогою методів тестування зручності використання, демонструючи ефективність стратегії у вирішенні обмежень, характерних для пристрою, забезпечуючи при цьому інклюзивний дизайн. Хоча підходу притаманні деякі обмеження, такі як потенційні компроміси у функціональності для простіших дизайнів, він пропонує надійну структуру для адаптації інтерфейсів між пристроями з різними обмеженнями (Zhou et al., 2018).

У статті Мандави С. К. представлено результати дослідження інтеграції машинного навчання (machine learning – ML) у робочі процеси розробки інтерфейсу для покращення веб-доступності. Дослідження спрямоване на усунення прогалин у дотриманні таких стандартів WCAG шляхом автоматичного виявлення та виправлення проблем із доступністю. Дослідження стосується таких критичних елементів доступності, як створення альтернативного тексту для зображень, покращення ролей ARIA, аналіз кольорового контрасту та тестування адаптивних інтерфейсів. Крім того, воно розглядає масштабованість і продуктивність моделей ML у середовищах розробки в реальному часі (Mandava, 2024).

Машинне навчання з його здатністю розпізнавати шаблони та динамічно адаптуватися представлено як трансформаційний інструмент для забезпечення доступності. Дослідження підкреслює переваги використання алгоритмів ML, таких як згорткові нейронні мережі (convolutional neural networks – CNN) для розпізнавання зображень і обробки природної мови (natural language processing – NLP) для аналізу контенту та для автоматизації виправлень доступності. Крім того, у дослідженні обговорюються стратегії збору даних

і маркування, необхідні для навчання моделей машинного навчання, адаптованих до потреб у доступності, підкреслюючи важливість наборів даних у вирішенні завдань, таких як створення точного альтернативного тексту або забезпечення відповідності кольорового контрасту (Mandava, 2024).

Дослідження також заглиблюється в етичні наслідки автоматизованих рішень, визнаючи обмеження моделей ML у повному розумінні вподобань користувачів і важливості збереження людського контролю. Він виступає за прозорість, справедливість і механізми зворотного зв'язку з користувачами для усунення упереджень у навчальних даних і забезпечення справедливих результатів. Пропонується інтеграція ML у динамічні структури контенту та аудит у реальному часі, щоб надати розробникам негайний зворотний зв'язок, підвищуючи зручність використання та інклюзивність веб-інтерфейсів (Mandava, 2024).

Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: Дж. Харріс, К. Фостер (Harris, Foster, 2022), С. Курняван (Kurniawan, 2021), Дж. МакЛін, К. Осей-Фрімпонг, К. Аль-Набхані, А. Даварі (McLean et al., 2021), С. Міноча, А. Рівз, А. Тінслі (Minocha et al., 2020), Л. Натан, П. Класня, Б. Фрідман (Nathan et al., 2020), С. Патіл, А. Чаван, С. Діксіт (Patil, 2022), І. Саркер, М. Хоссейн (Sarker, Hossain, 2021), Н. Шарма, В. Джейн, А. Мішра (Sharma et al., 2020), М. Сінгх, П. Рой (Singh, Roy, 2019), Л. Сміт, Р. Джонсон (Smith, Johnson, 2023), Т. Уокер, Д. Беркс (Walker, Burks, 2020), Т. Вестін, А. Аксельссон (Westin, Axelsson, 2021), Т. Чжан, С. Лю (Zhang, Liu, 2021) та інших.

Проте, беручи до уваги згадані наукові праці, питання, пов'язане зі створенням універсального дизайну веб-інтерфейсів, все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Мета статті – огляд стратегії універсализації дизайну веб-інтерфейсу шляхом адаптивної ієрархічної класифікації ARIA атрибутів з використанням GNN та BERT.

Виклад основного матеріалу. ARIA представляє парадигму, згідно з якою веб-базований контент імітує функціональність стандартним десктопних застосунків, але у той же час оперує у рамках веб-середовища. Одним з фундаментальних аспектів ARIA є запровадження атрибутів, які надають додаткове семантичне значення та функції доступності до HTML елементів. Серед них вирізняються рольові атрибути, які є важливим у контексті визначення мети певних

HTML тегів. Наприклад, в той час як тег `<body>` типічно слугує в якості загального контейнера документу, ARIA дозволяє присвоєння ролі йому, що виглядає як `role=«application»` задля вказання того, що він репрезентує інтерактивний віджет `role=«document»`, що дозволяє визначити статичний контент, призначений для читання. Подібним чином, тегу `<div>`, який часто є загальним у своєму стандартному стані, надаються ролі, як: `header`, `main`, `menu`, `footer`.

Поміж ролей, ARIA розширює функціональність атрибутів `alt` та `tabindex`. Атрибут `alt`, який традиційно використовується з метою забезпечення альтернативного тексту для зображень, удосконалюється таким чином, щоб застосовуватися до будь-якого об'єкту документа. Атрибут `tabindex` запроваджує удосконалені навігаційні можливості. Він уможливує контроль того, як елементи включаються у порядок вкладок. Даний параметр може приймати три типи значень:

- позитивний індекс – уточнює користувацьку послідовність навігації по вкладках;
- нульовий індекс – включає елемент у природному порядку вкладок відповідно до потоку документів;
- негативний індекс виключає елемент з порядку вкладок але дозволяє моделювання його програмним способом.

Наприклад, у наборі інтерактивних елементів керування, один елемент може бути призначений 0 індексу з метою функціонування в якості дефолтного фокусу, в той час як інші можуть отримати індекс – 1 до того моменту, як навігація не стане чітко налаштованою, як наприклад при використанні клавіш стрілок або інших елементів керування.

У додаток до рольових та навігаційних атрибутів, ARIA інтродукує великий набір станових та змінних властивостей, які мають префікс `aria-`. Дані властивості повідомляють про поточний статус або значення інтерактивних елементів асистивним технологіям, уможливаючи ефективну взаємодію користувачів з динамічними елементами керування. Приклади даних параметрів включають `aria-valuemin`, `aria-valuemax` та `aria-valuenow`. Найбільш частим застосуванням даних параметрів є реалізація повзунка. На рис. 1 представлено фрагменті коду, де зображено елементи керування для підлаштування розміру тексту.

В той час як візуальна складова повзунка визначається його HTML та CSS елементами, ARIA властивості забезпечують критично важливі метадані для асистивних технологій, передаючи мету елементу керування та його поточний стан.

```



```

Рис. 1. Елементи керування для підлаштування розміру тексту

Актуальне дослідження зосереджуватиметься на застосуванні ієрархічної мультилейболової (міткової) класифікації hierarchical multilabel classification (HMC) з метою автоматизації процесу класифікації ARIA атрибутів. Дана методологія ставить за мету визначення взаємовідносин та ролей в рамках DOM веб-ресурсу. Дані ролі та атрибути взаємодіють динамічним чином, що часто зазнає впливу взаємодій користувача з інтерфейсом або механізмів адаптивного контенту. HMC враховує структуровану природу ARIA атрибутів, відображаючи їх у багаторівневному класифікаційному фреймворку.

З точки зору більш конкретного методу, Global Model Approach із використанням GNN постає в якості одного з найбільш придатного напрямку класифікації, оскільки він уможливорює репрезентацію DOM структури в якості графу, в рамках якого вузли відповідають HTML елементам, а ребра показують взаємовідносини між ARIA ролями.

Перший етап у побудові даної моделі включає парсування дерева DOM веб-інтерфейса. Кожен елемент у DOM репрезентується в якості вузла, аугментованого з функцій вилучених з тегу HTML, CSS властивостей, ARIA атрибутів та текстового контенту. Ці функції далі вкладаються у векторний простір за допомогою мовної моделі BERT, що спеціалізується на охопленні текстових та семантичних залежностей; та алгоритму Node2Vec, задачею якого є охоплення структурних залежностей.

Генерація контекстних вкладень включає трансформацію текстової та структурної інформації у числові репрезентації, що охоплюють семантичні та контекстні взаємовідносини атрибутів в межах їх середовищ HTML та DOM. Початковий етап процесу полягає у токенизації атрибутивного тексту та асоційованого з ним контексту. BERT токенайзер розділяє вхідний текст у одиниці підслів, що уможливорює обробку комплексних та рідких термінів. Після процесу токенизації, послідовність вкладається у високорозмірний векторний простір з використанням початкового шару вкладення, який присвоює щільні вектори кож-

ному токени. Ці вкладання потім проходять через декілька трансформаційних шарів, в межах яких відбуваються обчислення контекстних взаємовідносин між токенами механізмами самоуваги:

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (1)$$

де Q, K, V репрезентують запит, ключ та матриці значень, вилучених з вхідних вкладень, відповідно, d_k , у свою чергу відповідає розмірності ключових факторів. У процесі даної операції забезпечується постійне оновлення вкладень кожного токена в залежності від його інтеракцій з іншими токенами послідовності.

Фінальний схований стан мовної моделі забезпечує контекстну репрезентацію для кожного токена, а вкладення CLS токена на початку послідовності часто використовується в якості холистичного відображення загального обсягу вхідних даних. В контексті ARIA атрибутів, такий тип вкладення енкапсулює не тільки атрибутивне семантичне значення, але також його взаємовідносини з навколишнім текстом та структурними елементами HTML.

Далі, за посередництва Node2Vec генеруються структурні вкладання для вузлів шляхом симуляції випадкових блукань на графі та кодування структурного контексту кожного елемента у вектор. Процес генерації випадкових блукань опосередковується формулою вірогідності переходу:

$$P(c_i | c_{i-1}) = \pi(c_i | c_{i-1}) / Z \quad (2)$$

де $\pi(c_i | c_{i-1})$ позначає ненормалізовану вірогідність переходу між вузлами c_i , c_{i-1} , в той час як Z являє собою константу нормалізації, яка забезпечує рівність вірогідності одиниці.

Згодом, обидва типи вкладень піддають комбінуванню задля створення уніфікованої репрезентації для кожного елемента DOM, змішуючи текстову семантику зі структурними взаємовідносинами. Задля валідації ARIA атрибутів, використовується косинусна подібність з метою вимірювання семантичного вирівнювання між вкладеннями елементів з референтними атрибутами та їх цільовими елементами:

$$Sim(A, B) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \quad (3)$$

де A, B являють собою вкладення елементів, які здійснюють посилення та на яких ці посилення здійснюються, відповідно. Високі значення подібності вказують на семантичну послідовність між атрибутом та його цілью.

GNN функціонує по принципу ітеративного оновлення вузлових вкладень через message pass-

ing. Під час кожної ітерації, вузлом агрегується інформація з його сусідів з використанням комбінацій функцій та повідомлень, отриманих з них. Наприклад, якщо кнопковий елемент має відповідну ARIA роль та є частиною форми, його репрезентація зазнаватиме впливу не тільки його власних атрибутів, але також і контекстної семантики його родинного елемента форми. Виходом нейронної мережі у даному випадку є набір вкладень, які кодують ієрархічну та контекстну інформацію кожного вузла. Класифікаційний шар застосовується до цих вкладень з метою подальшого передбачення належних ARIA атрибутів для кожного елемента.

Передбачення піддаються обмеженню відповідно до ієрархічних та контекстних правил ARIA. Наприклад, дочірній вузол не в змозі мати ARIA ролі, які є несумісними з роллю його материнського вузла, і такі атрибути мають вказувати на дійсні ідентифікатори в DOM. Такі обмеження інтегруються у модель за допомогою функцій втрат. Таким чином, автоматичне передбачення та валідація ARIA атрибутів забезпечує більшу адаптивність дизайну веб-інтерфейса під користувацькі та апаратні вимоги. Наприклад, втрата перехресної ентропії використовується задля безпосереднього процесу мультикласової класифікації, оскільки вона є ефективною у контексті передбачення ймовірностей для декількох класів, у той же час пеналізуючи неправильні передбачення. У даному контексті, передбачувані ймовірності узгоджуються з істинними мітками задля мінімізації відстані між їхніми розподілами, забезпечуючи точні передбачення для ARIA атрибутів, де кожний елемент може належати до багатьох категорій. Задля створення ієрархічної узгодженості використовується концепція функції ієрархічної втрати, згідно з якою, здійснюється пеналізація передбачень, які порушують залежність «материнство-дочірність». В ході даної функції втрат встановлюється необхідність відповідності материнських ролей вищим значенням ймовірності, або тим, що дорівнюють дочірнім, що у свою чергу зберігає ієрархію ролей. Іншим критичним аспектом є структурні взаємовідносини, зазначені в межах DOM графу. Підтримання цих взаємовідносин реалізується за допомогою графової регуляризаційної втрати, яка штрафує модель за здійснення генерації вкладень, які не відповідають структурними подібностям з'єднаних вузлів у межах графа. Функція фокальної втрати застосовується задля мультилейболової класифікації з дисбалансованими даними, зосереджуючись на екземплярах, передбачення яких є затрудненим. У кінцевому випадку використовується ваговий

механізм, який відповідає за балансування класів. Узгодженість між текстовими та графовими вкладеннями керується за посередництва втрати косинусної подібності. При мінімізації даної втрати, забезпечується комплементарність обох вкладень. Пеналізація неправильних посилань в межах ARIA атрибутів здійснюється за допомогою втрати валідації посилання, яка перевіряє узгодженість між елементами, які здійснюють посилання та тими, на яких ці посилання здійснюються за допомогою вимірювання косинусної подібності між двома вкладеннями. Нарешті, уникнення переобладнання моделі реалізується за допомогою регуляризаційної L2 втрати, яка запобігає тому, щоб модель повністю поклядалася на специфічні функції, зосереджуючи уваги на генералізації на усіх DOM структурах.

Фундамент структури будь-якого веб-інтерфейсу полягає у його здатності передавати чітку та значиму інформацію. Таким чином, враховуючи адаптивну класифікацію ARIA атрибутів, вони мають не тільки визначати мету інтерактивних компонентів, але також адаптуватися динамічним чином до контекстних вимог, як наприклад трансформація div контейнера у доступний модальний діалог `role=>dialog` з асоційованими атрибутами. Більш того, вбудовування динамічних контентних описів з відповідними атрибутами забезпечує те, що зміни в інтерфейсі повідомляються ефективним чином до асистивних технологій. До того ж, універсалізація веб-дизайну має враховувати характер того, як користувач взаємодіє з різними елементами та як вони розвиваються у реальному часі. Навігація має включати варіативні способи вводу інформації, включаючи дотик, рух очей та голос.

Висновки. Загалом, застосування НМС до ARIA атрибутів створює основу для веб-дизайнерів для автоматизації процесів валідації та генерації функцій доступності, забезпечуючи узгодженість із WCAG стандартами. Даний підхід не тільки удосконалює точність та послідовність імплементаційної стратегії ARIA, але також інтегрує основу для підвищення веб-доступності ресурсів.

Перспективи подальших розвідок у цьому напрямі полягають у розширенні підходів до ієрархічної класифікації ARIA-атрибутів з урахуванням нових стандартів веб-доступності. Можливе дослідження впровадження інших мовних моделей для покращення семантичного аналізу, а також адаптація методології до більш складних інтерфейсів, наприклад, у мобільних додатках або віртуальній реальності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Harris J., Foster C. Challenges in integrating machine learning in frontend development workflows for accessibility. *Web Development Review*, 2022. №29. №4. P. 233–245.
2. Kurniawan S. H. Machine learning approaches to accessibility testing. *Journal of Web Development and Accessibility*, 2021. №18. №2. P. 215–229.
3. Mandava S. K. AI-powered accessibility: Using machine learning to detect and correct accessibility gaps in web interfaces. *Frontiers in Health Informatics*, 2024. №13.
4. McLean G., Osei-Frimpong K., Al-Nabhani K., Davari A. AI in service: The challenge of human interaction with chatbots. *Computers in Human Behavior*, 2021. №114. DOI: 10.1016/j.chb.2020.106553.
5. Minocha S., Reeves A., Tinsley A. Implementing machine learning algorithms for real-time accessibility auditing in web development. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2020. №139. 102546.
6. Nathan L. P., Klasnja P., Friedman B. Social implications of AI for accessibility in digital environments. *Journal of Human-Computer Interaction*, 2020. №36. №8. P. 749–764.
7. Patil S. D., Chavan A. R., Dixit S. Advances in ML for improving accessibility: Analysis of automated compliance with WCAG standards. *International Journal of Digital Accessibility*, 2022. №10. №2. P. 184–197.
8. Sarker I. H., Hossain M. S. Applications of machine learning for enhancing user interaction and accessibility on web interfaces. *Journal of Data Science and Technology*, 2021. №15. №4. P. 89–102.
9. Sharma N., Jain V., Mishra A. An analysis of digital accessibility and its significance. *Journal of Accessibility Studies*, 2020. №5. №1. P. 45–57.
10. Singh M., Roy P. The integration of machine learning into web accessibility assessments: A comprehensive review. *Computers and Education*, 2019. №140. 103605.
11. Smith L., Johnson R. Using reinforcement learning for web accessibility improvements. *International Journal of Artificial Intelligence Research*, 2023. №45. №7. P. 1001–1023.
12. Walker T., Burks D. Addressing ethical implications of AI in web accessibility. *Journal of Ethics in AI*, 2020. №2. №3. P. 233–248.
13. Westin T., Axelsson A. S. Machine learning's role in adapting digital platforms for accessibility: An in-depth study. *Universal Access in the Information Society*, 2021. №20. №3. P. 531–545.
14. Zhang T., Liu S. Exploring the potential of AI in web accessibility: A review of emerging technologies. *Advances in AI and Human-Computer Interaction*, 2022. №3. №1. P. 56–71.
15. Zhou Q., Ren L., Zhang T. The impact of AI on accessibility: Ensuring inclusive design for all. *Journal of Modern Computing*, 2018. №26. №3. P. 341–358.

REFERENCES

1. Harris, J., & Foster, C. (2022). Challenges in integrating machine learning in frontend development workflows for accessibility. *Web Development Review*, 29 (4), 233–245
2. Kurniawan, S. H. (2021). Machine learning approaches to accessibility testing. *Journal of Web Development and Accessibility*, 18 (2), 215–229
3. Mandava, S. K. (2024). AI-powered accessibility: Using machine learning to detect and correct accessibility gaps in web interfaces. *Frontiers in Health Informatics*, 13
4. McLean, G., Osei-Frimpong, K., Al-Nabhani, K., & Davari, A. (2021). AI in service: The challenge of human interaction with chatbots. *Computers in Human Behavior*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106553>
5. Minocha, S., Reeves, A., & Tinsley, A. (2020). Implementing machine learning algorithms for real-time accessibility auditing in web development. *International Journal of Human-Computer Studies*, 139, 102546
6. Nathan, L. P., Klasnja, P., & Friedman, B. (2020). Social implications of AI for accessibility in digital environments. *Journal of Human-Computer Interaction*, 36 (8), 749–764
7. Patil, S. D., Chavan, A. R., & Dixit, S. (2022). Advances in ML for improving accessibility: Analysis of automated compliance with WCAG standards. *International Journal of Digital Accessibility*, 10 (2), 184–197
8. Sarker, I. H., & Hossain, M. S. (2021). Applications of machine learning for enhancing user interaction and accessibility on web interfaces. *Journal of Data Science and Technology*, 15 (4), 89–102
9. Sharma, N., Jain, V., & Mishra, A. (2020). An analysis of digital accessibility and its significance. *Journal of Accessibility Studies*, 5 (1), 45–57
10. Singh, M., & Roy, P. (2019). The integration of machine learning into web accessibility assessments: A comprehensive review. *Computers and Education*, 140, 103605
11. Smith, L., & Johnson, R. (2023). Using reinforcement learning for web accessibility improvements. *International Journal of Artificial Intelligence Research*, 45 (7), 1001–1023
12. Walker, T., & Burks, D. (2020). Addressing ethical implications of AI in web accessibility. *Journal of Ethics in AI*, 2 (3), 233–248
13. Westin, T., & Axelsson, A. S. (2021). Machine learning's role in adapting digital platforms for accessibility: An in-depth study. *Universal Access in the Information Society*, 20 (3), 531–545
14. Zhang, T., & Liu, S. (2022). Exploring the potential of AI in web accessibility: A review of emerging technologies. *Advances in AI and Human-Computer Interaction*, 3 (1), 56–71
15. Zhou, Q., Ren, L., & Zhang, T. (2018). The impact of AI on accessibility: Ensuring inclusive design for all. *Journal of Modern Computing*, 26 (3), 341–358