

ПРУС Олег

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-2514-9871>

e-mail: 00-23-022.stud@vntu.edu.ua

МАЙДАНЮК Володимир

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2386-6603>

e-mail: maidaniuk@vntu.edu.ua

ЕМПІРИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УЗАГАЛЬНЕНОГО ЗАКОМУ АМДАЛА У ВЕБ-ІНТЕРФЕЙСАХ

У статті представлено відтворену методику емпіричного оцінювання параметрів узагальненого закону Амдала для веб-інтерфейсів із фокусом на перцентильні UX-метрики. Запропоновано багаторесурсну модель критичного шляху з частками етапів α (мережа, JS/CPU, рендер тощо), локальними прискореннями s для окремих технік оптимізації та явним урахуванням неадитивності через множники взаємодій κ . Ідентифікацію параметрів реалізовано на основі дворівневих факторних дизайнів 2^k і регресії в лог-просторі перцентилів $\log(P95)$ з коваріатами страт (клас пристрою, тип мережі, стан кешу). Операціоналізацію α здійснено за Chrome trace/HAR через робастний «breakdown» часу; оцінювання s – за парами «увімкнено/вимкнено» та, за необхідності, у схемі difference-in-differences на польових даних (RUM). Якість прогнозів контролюється через MAPE та RMSE у лог-шкалі, невизначеність – через bootstrap-інтервали; калібровка «факт $\rightarrow$ прогноз» перевіряє зсув і масштаб. На репрезентативних маршрутах (hero-зображення та списковий інтерфейс) показано, що попарні взаємодії оптимізацій істотно впливають на LCP_{p95} та INP_{p95} , а безпосереднє моделювання κ зменшує похибку передбачення порівняно з адитивними припущеннями. Отримано типові похибки 6–9% для перцентильних метрик із коректною калібровкою масштабу, що є достатнім для включення оцінених (α, s, κ) до процедур перцентильного прогнозування та планування «пакетів» змін у CI-циклах. Практичну значущість становить перехід від евристичного налаштування до кількісно обґрунтованого вибору оптимізацій із прозорою інтерпретацією внесків і взаємодій. Наукова новизна полягає у поєднанні багаторесурсної моделі з перцентильною регресією й явним урахуванням неадитивності для промислових веб-систем.

Ключові слова: узагальнений закон Амдала; багаторесурсна модель; перцентильні UX-метрики; Largest Contentful Paint (LCP); Interaction to Next Paint (INP); факторні плани 2^k ; взаємодії оптимізацій; Chrome trace/HAR; Real User Monitoring (RUM); bootstrap; калібровка; прогнозування продуктивності; CI/CD; дорожні карти оптимізації.

PRUS Oleh, MAIDANIUK Volodymyr

Vinnitsia National Technical University

EMPIRICAL ESTIMATION OF PARAMETERS OF THE GENERALIZED AMDAHL'S LAW IN WEB INTERFACES

The article presents a reproducible methodology for empirical estimation of the parameters of a generalized Amdahl's law for web interfaces, with a focus on percentile UX metrics. A multi-resource model of the critical path is proposed with stage shares α (network, JS/CPU, rendering, etc.), local speedups s for individual optimization techniques, and explicit non-additivity via interaction multipliers κ . Parameter identification is implemented on the basis of two-level factorial designs 2^k and regression in the log space of percentiles $\log(P95)$ with stratum covariates (device class, network type, cache state). Operationalization of α is performed from Chrome trace/HAR via a robust time breakdown; estimation of s is carried out using on/off pairs and, where necessary, a difference-in-differences scheme on field (RUM) data. Forecast quality is assessed using MAPE and RMSE in log scale; uncertainty is quantified via bootstrap intervals; fact-to-forecast calibration checks bias and scale. On representative user journeys (a hero-image page and a list interface) it is shown that pairwise optimization interactions substantially affect LCP_{p95} and INP_{p95} , and that explicit modeling of κ reduces prediction error compared to additive assumptions. Typical errors of 6–9% are obtained for percentile metrics with correct scale calibration, which is sufficient to include the estimated (α, s, κ) in percentile-forecasting procedures and in planning "packages" of changes within CI cycles. The practical significance lies in the transition from heuristic tuning to quantitatively justified selection of optimizations with transparent interpretation of contributions and interactions. The scientific novelty consists in combining a multi-resource model with percentile regression and explicit non-additivity for industrial web systems.

Keywords: generalized Amdahl's law; multi-resource model; percentile UX metrics; Largest Contentful Paint (LCP); Interaction to Next Paint (INP); 2^k factorial designs; optimization interactions; Chrome trace/HAR; Real User Monitoring (RUM); bootstrap; calibration; performance forecasting; CI/CD; optimization roadmaps.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.08.2025

Прийнята до друку / Accepted 23.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Оптимізація продуктивності веб-інтерфейсів у промислових умовах здебільшого виконується евристично: команди застосовують локальні техніки (lazy-loading, code-splitting, preconnect тощо) і постфактум оцінюють ефект. Такий підхід погано масштабується в багатопроектних/монорепозіторіях,

призводить до втрат часу та бюджету і не гарантує покращення перцентильних UX-метрик (перцентиль p – значення метрики, нижче якого лежать $p\%$ спостережень; зокрема P95/P99), критично важливих для користувацького досвіду й договорів про рівень обслуговування [1].

Корінь проблеми – відсутність стандартизованої, відтворюваної процедури емпіричного оцінювання параметрів моделі продуктивності, яка адекватно відображає: багаторесурсну природу критичного шляху (мережа, JS/CPU, рендеринг/пейнт, I/O/кеші), неадитивність ефектів (коли поєднання технік або підсилює, або «перекриває» одна одну), «важкі хвости» розподілів часу, через які середні й медіани не репрезентують P95/P99. Формальною базою є узагальнений закон Амдала (розклад загального часу на частки і прискорення s_j по етапах) із матрицею взаємодій кдля пар технік; однак ці параметри рідко ідентифікують коректно на реальних даних [2].

Додаткову складність створює розрив між лабораторними прогонами і польовими умовами: synthetic вимірювання забезпечують контроль, але страждають від штучності середовища; RUM (Real User Monitoring) відбиває реальність, але забруднений варіативністю мережі/пристроїв/кешів. Без стратифікації (розбиття на страти за класами пристроїв, типами мереж і станами кешу) і робастних процедур агрегації отримані параметри нестабільні й погано переносні між релізами та проектами.

Таким чином, загальна наукова проблема полягає у розробленні та обґрунтуванні методики емпіричного добування параметрів (α, s, κ) узагальненого закону Амдала для веб-інтерфейсів, яка: коректно працює з перцентильми, враховує багаторесурсну структуру часу та взаємодії оптимізацій, забезпечує оцінку невизначеності, стабільності та переносимості параметрів у різних стратах та середовищах [3].

Зв'язок із важливими науковими завданнями. Поставлена проблема лежить на перетині статистичного моделювання багатокоріневих розподілів і перцентильної регресії, експериментального дизайну у складних технічних системах (дворівневі факторні плани 2^k , дробові плани, blocking/рандомізація), ідентифікації параметрів у багатофакторних моделях із взаємодіями. Вирішення завдання сприяє розвитку методів ідентифікації та калібровки моделей продуктивності з чіткими припущеннями, оцінкою похибок (bootstrap-CI) і перевіркою гіпотез (A/A-фази, інваріанти розкладу), що має самостійну наукову цінність [2].

Зв'язок із практичними завданнями інженерії продуктивності. Валідні оцінки α, s і κ перетворюють набір «хаотичних» технік на простір рішень, де кожне втручання має очікуваний вплив на LCP_{P95}/INP_{P95} і довірчі інтервали. Це дає змогу:

- формувати дорожні карти оптимізацій з пріоритизацією «виграш/вартість» у CI-процесах (CI – безперервна інтеграція в пайплайнах збірки);
- зменшувати ризик «дорогих і малоефективних» робіт завдяки пояснюваності внесків мережі/CPU/рендера та явним взаємодіям;
- підвищувати відтворюваність і порівнюваність результатів між командами/проектами завдяки уніфікованому збору даних (Chrome trace/HAR, RUM/synthetic), стратифікації та стандартизованим метрикам якості (MAPE, RMSE, калібровка).

У підсумку сформульована проблема безпосередньо адресує потребу галузі у кількісно обґрунтованій (а не евристичній) підтримці прийняття рішень щодо оптимізацій веб-інтерфейсів, створюючи методичне підґрунтя для наступного етапу – перцентильного прогнозування та автоматизованого roadmap-планування у великих фронтенд-системах [3].

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

За останні роки у сфері продуктивності веб-інтерфейсів спостерігається перехід від емпіричних рекомендацій до моделей, що оперують параметрами із чіткою інтерпретацією: частками часу окремих етапів (мережа, JS/CPU, рендеринг), локальними прискореннями та їхніми взаємодіями. Актуалізацію теми підсилює поява й стандартизація перцентильних UX-метрик (передусім INP і LCP), які більше корелюють із сприйняттям користувача, ніж середні значення. Паралельно спільнота консолідувала практики збору даних (Chrome traces/HAR, RUM і synthetic), а також уточнила нормативні визначення метрик у W3C-специфікаціях і довідниках для розробників. Ключовими напрямками сучасних робіт є: узагальнення закону Амдала на множину ресурсів і приведення задачі до регресійної форми; експериментальні дослідження конкретних технік (кешування, resource hints, сучасні формати зображень) із наголосом на перцентилі; уніфікація процедур вимірювання та трасування, необхідних для стабільної ідентифікації параметрів моделей у промислових умовах.

Chaityanya Poolla, Rahul Saxena (2021) у роботі “On Extending Amdahl’s Law to Learn Computer Performance” пропонують розширення закону Амдала для випадку множини конфігурованих ресурсів і показують, як перетворити підсумкове рівняння швидкодії на задачу багатофакторної регресії. На експериментальних наборах (58 тестів, кілька апаратних платформ) продемонстровано високу точність крос-валідації ($\approx 95\%$) та застосовність підходу для прогнозування ефектів одночасних змін ресурсів. Це безпосередньо підкріплює використання параметрів α і s та дає методичну основу для оцінки взаємодій у складних системах [4].

Ivano Malavolta та ін. (2020) у статті “Evaluating the Impact of Caching on the Energy Consumption and Performance of Progressive Web Apps” емпірично досліджують вплив стану кешу на продуктивність і енергоспоживання PWA на реальних пристроях. Показано, що «теплий» кеш помітно зсуває перцентилі часу завантаження, а ефекти залежать від контенту й сценарію доступу; надано пакет відтворення експериментів. Результати обґрунтовують стратифікацію за станом кешу та вимірювання в полі (RUM) [5].

Chrome/Web Dev team (2024) у публікації “Interaction to Next Paint becomes a Core Web Vital on March 12” формально оголошують заміну FID на INP як метрику Core Web Vitals з 12 березня 2024 р., описують причини зміни та дорожню карту поступового виведення FID з інструментів. Це надає нормативну основу використовувати INP(P95/P75 у полі) як цільовий показник чутливості інтерфейсу [6].

Jeremy Wagner, Barry Pollard та ін. (оновлювана стаття, 2023–2025) “Interaction to Next Paint (INP)” детально визначають INP, механіку вимірювання у RUM і лабораторії, а також чинники впливу на «довгі взаємодії» (long tasks, блокування main thread). Наголошено на різниці між польовими та синтетичними умовами і важливості коректної агрегації перцентилів [7].

W3C Web Performance WG (2025) у специфікації “Largest Contentful Paint” унормовують API, алгоритм відбору LCP-елемента та пов’язані концепти (напр., largest contentful paint size, набір контенту), що є «джерелом істини» для інструментів збору й аналізу. Специфікація важлива для мапування подій у трасах на внески етапів, пов’язаних із LCP [8].

Philip Walton, Barry Pollard (2020, оновлення) у гайді “Optimize Largest Contentful Paint” підкреслюють холистичний характер LCP: поліпшення вимагають одночасної роботи з TTFB, виявленням і пріоритизацією ресурсу LCP, а також із затримками рендерингу. Звідси випливає неадитивність локальних прийомів і потреба моделювати взаємодії оптимізацій [9].

Chrome/Web Dev team (2024) у матеріалі “Common misconceptions about how to optimize LCP” додатково показують, що фокус на одній підчастині (напр., тільки на форматах зображень) часто дає обмежений ефект; рекомендовано перевіряти кожен складову часу до LCP і оцінювати сумарний вплив змін. Це резонує з підходом факторних планів 2^k [10].

MDN Web Docs (2025) у довіднику “RUM vs. synthetic monitoring” систематизують призначення польових і синтетичних вимірювань: RUM краще для трендів та порівняння перцентилів у реальних умовах, synthetic – для регресійного тестування та контрольованих змін. Рекомендації узгоджуються з практикою стратифікації за пристроями / мережами / кешем [11].

Annie Sullivan (2023) у дописі “Digging through Chrome traces: an introduction with an example” (PerfPlanet Web Performance Calendar) надає практичний вступ до Chrome/Perfetto-трас, типів подій і базових прийомів аналізу. Матеріал корисний для побудови стабільного «breakdown» часу та оцінювання часток α_j [12].

Chromium Developers (живі документи) у “Trace Event Format” та “Trace Event Best Practices” описують формат JSON-подій, категоризацію та рекомендації з інструментування, що зменшують похибки трасування й підвищують відтворюваність вимірювань. Використання цього формату – ключ до коректного витягу внесків для моделі [13].

MDN Web Docs (2025) у довіднику “rel=’preconnect’” формально визначають семантику підказки preconnect (DNS+TCP+TLS), застерігають від надмірного використання та радять застосовувати її лише до критичних ориджинів. Це важливо для реалістичної оцінки очікуваного прискорення мережевої частини LCP [14].

Web.dev – Learn Performance (2023) у статті “Assist the browser with resource hints” узагальнюють практику preconnect, dns-prefetch, preload, Fetch Priority, підкреслюючи необхідність польової валідації ефекту та пріоритизації лише критичних ресурсів [15].

HTTP Archive, Web Almanac (2020) у розділі “Resource Hints” підкріплюють статистикою поширеність та вплив підказок (dns-prefetch, preconnect, preload, prefetch), прямо рекомендують вимірювати вплив у полі (Web Vitals, Perfume.js). Дані корисні для встановлення апіорних очікувань щодо су мережевій підсистемі [16].

Addy Osmani (Smashing Magazine) (2021) у статті “Using Modern Image Formats: AVIF and WebP” показує потенціал сучасних форматів зображень (нерідко до $\approx 50\%$ додаткового стиснення проти JPEG/PNG) та обговорює компроміси якості. З огляду на часту роль зображення як LCP-елемента, цей результат напряму впливає на параметр s_d підетапу завантаження ресурсу [17].

Matthew Blackwell, Nicole E. Pashley (2023) у статті “Noncompliance and Instrumental Variables for 2^k Factorial Experiments” (JASA) розробляють методологію аналізу факторних планів за неповної відповідності протоколу (noncompliance) на будь-якій кількості факторів, зокрема із взаємодіями. Розв’язки в термінах інструментальних змінних релевантні для промислових експериментів продуктивності, де техніки іноді вмикаються/вимикаються не за планом [18].

Сукупність сучасних публікацій формує цілісне методичне поле для емпіричного оцінювання параметрів узагальненого закону Амдала у веб-системах. Розширення закону Амдала на множину ресурсів і

його редукція до регресійної постановки забезпечують математичний каркас для параметрів α , s і взаємодій. Стандартизація метрик (INP/LCP) у W3C та web.dev ілюструє, що саме потрібно вимірювати, а сучасні практики трасування й RUM-vs-synthetic – як саме збирати валідні дані. Емпіричні роботи з кешування, resource hints і форматів зображень дають реалістичні апіорні діапазони очікуваних прискорень і підтверджують неадитивність ефектів, що обумовлює необхідність моделювати взаємодії. Нарешті, методи аналізу факторних експериментів за неповної відповідності протоколу підвищують надійність висновків у реальних СІ-середовищах. У підсумку, поле готове до системної інтеграції цих компонентів у єдину процедуру ідентифікації параметрів, придатну для багатоетапних, багаторесурсних і багатопроектних веб-систем [19].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є обґрунтування та вдосконалення відтворюваної методики емпіричного оцінювання параметрів узагальненого закону Амдала у веб-інтерфейсах із урахуванням перцентильних UX-метрик. Під параметрами розуміються: частки етапів α (нормовані внески мережі, JS/CPU, рендерингу тощо у базовому стані), локальні прискорення s (очікуваний множник скорочення часу відповідного етапу під дією конкретної техніки) та взаємодії оптимізацій κ (множники, що відбивають суб- чи суперадитивність ефектів при поєднанні технік).

Для досягнення зазначеної мети у статті передбачено: формалізацію мапування подій Chrome trace/HAR на етапи критичного шляху та визначення малочутливих правил підрахунку часток α у розрізі страт (клас пристрою, тип мережі, стан кешу) [20]; побудову процедур оцінювання локальних прискорень s за даними пар «увімкнено/вимкнено» та, за потреби, за схемою difference-in-differences на польових даних (RUM) із контролем коваріат [21]; ідентифікацію взаємодій κ за допомогою дворівневих факторних планів 2^k і регресії в лог-просторі перцентилів $\log(P95)$ з термінами взаємодій; кількісну оцінку невизначеності параметрів через bootstrap та перевірку стабільності оцінок у часі (A/A-фази, інваріанти розкладу) [22]; визначення мінімального експериментального дизайну й вимог до обсягу даних, достатніх для надійних перцентильних оцінок [23]; встановлення критеріїв якості (MAPE, RMSE, калібрувальні моделі «факт на прогноз») та правил стратифікованої звітності [24]; підготовку уніфікованих шаблонів таблиць і артефактів (структури даних, скрипти витягу/оцінювання), придатних для повторного використання в СІ-процесах [25].

Сформульовані цілі спрямовані на створення методичної основи, яка забезпечує коректність, наочність і відтворюваність оцінок (α, s, κ) у промислових умовах, і, відповідно, дозволяє обґрунтовано використовувати ці оцінки як вхідні параметри у подальших моделях перцентильного прогнозування та планування оптимізацій веб-інтерфейсів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розв'язання задачі коректного, відтворюваного й пояснюваного оцінювання впливу оптимізацій на перцентильні UX-метрики (передусім LCP_{P95} та INP_{P95}) вимагає поєднання формальної моделі продуктивності з практикою збору й аналізу даних у промислових умовах. У межах статті сформовано цілісний конвеєр: декомпозиція критичного шляху на етапи та операціоналізація часток α і локальних прискорень s ; корекція очікуваного ефекту з урахуванням взаємодій оптимізацій κ ; оцінювання параметрів на основі регресійної моделі в лог-просторі перцентилів; перевірка якості прогнозів через MAPE, аналіз «хвостів» та калібровку «факт $\rightarrow$ прогноз». Нижче послідовно викладено модельні припущення, способи оцінювання кожного параметра, інтерпретації та практичні застереження [18].

Базова оцінка очікуваного відносного часу задається сумою нормованих внесків етапів із їхніми прискореннями:

$$T_{rel} \approx \sum_{j=1}^m \frac{\alpha_j}{s_j} \quad (1)$$

тут m – кількість узагальнених етапів критичного шляху (наприклад: мережа – DNS/TCP/TLS/TTFB/контент; JS/CPU – parse/compile/execute; рендер – style/layout/paint/composite; інше). Частка $\alpha_j \in [0,1]$ – нормований внесок часу етапу j у базовому стані з обмеженням $\sum_j \alpha_j = 1$. Параметр $s_j \geq 1$ – локальне прискорення етапу j під дією конкретної техніки чи набору технік; $s_j = 1$ означає відсутність зміни. Значення $T_{rel} = 1$ відповідає базі; $T_{rel} < 1$ – очікуване скорочення.

Формула (1) дає «перший порядок» очікуваного ефекту, коли етапи не змагаються за вузькі спільні ресурси (наприклад, main thread чи мережеві з'єднання) і вкладені накладні (overheads) незначні. На практиці (особливо для SPA/SSR) цей підхід є корисною точкою відліку та «мостом» до емпіричних поправок. У близьких релізах частки змінюються повільно; це перевіряється A/A-фазами й варіацією у втратах (клас пристрою, тип мережі, стан кешу). Кожна техніка здебільшого впливає на піднабір етапів; мапування «техніка $\rightarrow$ етап(и)» визначається за трасами та профілями. У розподілах із «важкими хвостами» для α і сдоцільно використовувати медіани/тримінг [13].

Однак ефекти технік часто неадитивні: наприклад, скорочення розміру LCP-зображення (формати AVIF/WebP) та reconnect до одного і того ж модуля можуть частково перекриватися (субадитивність), тоді як скорочення JS-бандла і віртуалізація списків здатні взаємно підсилюватися (суперадитивність).

Модель із взаємодіями. Для пакета технік $A = \{a_1, \dots, a_k\}$, де $a_p \in \{0,1\}$ – індикатор увімкнення p -ї техніки, вводиться корекція:

$$T_{rel} \approx \left(\sum_{j=1}^m \frac{\alpha_j}{s(A)} \right) \cdot \prod_{(p,q) \in I} \kappa_{pq}^{a_p a_q} \quad (2)$$

тут $s_j(A)$ – ефективне прискорення етапу j під пакетом A (допускає, що одна техніка впливає на кілька етапів), а κ_{pq} – множник взаємодії пари технік (p, q) :

- $\kappa_{pq} < 1$: суперадитивність (підсилення),
- $\kappa_{pq} > 1$: субадитивність (перекриття/накладні),
- $\kappa_{pq} = 1$: відсутність взаємодії.

Ідентифікація та обмеження.

- Множники κ_{pq} оцінюються емпірично (див. регресію (3)).
- Доцільно обмежуватися попарними взаємодіями; вищі порядки вводяться лише за наявності достатнього дизайну/потужності.
- Для стабільності параметрів корисні регуляризація та/або інформативні апіорі (наприклад, κ_{pq} близько до 1, якщо етапи не пов'язані).

Перцентилі $P95/P99$ характеризують «хвости» і схильні до мультиплікативних змін; лог-перетворення стабілізує дисперсію, полегшує інтерпретацію множників як різниць у лог-шкалі та переводить добутки у суму. На даних факторного плану 2^k моделюється регресійна модель у лог-просторі перцентилів:

$$Y = \log(P95(metric)) = \beta_0 + \sum_{p=1}^k \beta_p a_p + \sum_{p < q} \beta_{pq} a_p a_q + Z\gamma + \varepsilon, \quad (3)$$

де $a_p \in \{0,1\}$ – фактори (техніки), Z – коваріати страт (клас пристрою, мережа, кеш) та «контролі» (часова бінаризація, регіон, версія). Для підвищення ортогональності частіше застосовується контрастне кодування $\{-1, +1\}$, але інтерпретації нижче зберігаються і для $\{0,1\}$. Зв'язок із s та κ . Експонування коефіцієнтів дає оцінки множників:

$$\hat{s}_p = e^{-\hat{\beta}_p}, \quad \hat{\kappa}_{pq} = e^{-\hat{\beta}_{pq}}.$$

Отже, від'ємне $\hat{\beta}_p$ відповідає прискоренню (менший перцентиль), а знак $\hat{\beta}_{pq}$ визначає тип взаємодії (супер-/субадитивність). Для оцінювання та похибки – допускається OLS з нечутливими стандартними похибками (HC3) або змішані моделі, якщо є ієрархія (маршрути/сервери). Для залежних спостережень у часі доцільні кластер-нечутливі SE (кластер – «запуск»/«реліз»). При дробових планах контролюється роздільність (недопущення злиття головних ефектів з ключовими взаємодіями) та колінеарність (VIF). Оцінювання ведеться у стратах, далі результати агрегуються вагами польового трафіку. Для INP корисно включати коваріати довгих JS-задач та input type (клік/тач/клавіатура). Для LCP доцільно явно кодувати тип LCP-елемента (зображення/текст) і походження ресурсу (same-origin/CDN) [19].

Операціоналізація параметрів α та s на трасах і метриках полягає в наступному: для витягу α для кожної страти формується breakdown часу з Chrome trace/HAR, де події зводяться до груп етапів (мережа, JS/CPU, рендер, інше). Частка визначається як відношення медіанного часу етапу до медіанного сумарного часу у базовій конфігурації. Для малочутливості рекомендовано 10–20% тримінг «хвостів», перевірку балансу (сума часток = 1), стабільності між днями/релізами та інваріантів (відсутність «витоків» часу між групами). Оцінка s складається з пар «увімкнено/вимкнено» на контрольованих прогонах: $\hat{s}_j \approx \text{median}(T_{j,\text{base}}) / \text{median}(T_{j,\text{on}})$. Якщо доступні лише польові дані – difference-in-differences із коваріатами середовища; за можливості – інструментальні коверіати (напр., контроль розміру LCP-зображення). Для узгодження з перцентильними цілями корисно валідувати $\hat{s}_j$ проти зсувів квантилів підетапів (наприклад, P75/P90 decode-time). Зв'язок із моделлю (1)–(2). Оцінки α та s у стратах формують основу для локального T_{rel} ; множники $\hat{\kappa}$ із регресії (3) коригують очікування на рівні пакета [16].

Для оцінки відносної точності використовується середня абсолютна відсоткова похибка:

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right|, \quad (4)$$

де y_i – фактичні перцентилі (RUM або синтетичні у контрольованих умовах), $\hat{y}_i$ – відповідні прогнози. MAPE відчутна до малих y_i ; тому у звітах доцільно дублювати RMSE у лог-шкалі або Symmetric MAPE (sMAPE), а також аналізувати відсоток покриття довірчими інтервалами.

Для перевірки каліброваності «факт на прогноз» використовується модель:

$$y = \alpha + \beta \hat{y} + \varepsilon \quad (5)$$

Ідеальна узгодженість відповідає $\alpha \approx 0$, $\beta \approx 1$. Відхилення інтерпретуються як систематичний зсув (зміщення) або пере/недооцінка масштабу (нахил). Калібрування виконується по кожній страті з подальшою агрегованою оцінкою (з вагою трафіку), що дозволяє виявляти «слабкі» зони моделі (наприклад, low-end пристрої на 3G) і коригувати правила побудови α , мапування технік чи набір ковертіатів у (3).

Реалізація передбачає послідовний конвеєр від збору даних до звітності. Спершу виконується уніфікація джерел (Chrome trace/HAR, RUM, synthetic) і нормалізація ознак: усі сесії маркуються стратами за класом пристрою, типом мережі, станом кешу, часовим інтервалом, регіоном і версією збірки. На цьому ж етапі забезпечується узгодженість форматів та ідентифікація релізів, що унеможливило змішування періодів. Далі формується завадостійкий розклад часу за етапами критичного шляху і обчислюються частки α_j у кожній страті (медіани, тримінг хвостів, перевірка балансу $\sum_j \alpha_j = 1$ і стабільності в A/A-періодах) [11].

Після встановлення базових часток планується факторний експеримент 2^k (повний або дробовий) із заздалегідь обраною роздільною здатністю, що не змішує головні ефекти з критичними взаємодіями. Запуски рандомізуються у часі, а комбінації технік рівномірно розподіляються між стратами (blocking), щоб мінімізувати конфаунди середовища. На підставі пар «увімкнено/вимкнено» для цільових технік оцінюються локальні прискорення s на рівні підетапів; коли доступні лише польові дані, застосовується difference-in-differences із коваріатами середовища та, за потреби, кластер-робастними стандартними похибками. Паралельно на сукупності комбінацій виконується регресія в лог-просторі перцентилів (модель (3)), яка повертає інтерпретовані множники $\hat{s}_p = e^{-\hat{\beta}_p}$ та взаємодії $\hat{\kappa}_{pq} = e^{-\hat{\beta}_{pq}}$; у наявності ієрархії (маршрути, сервери) доцільні змішані моделі.

Контроль якості здійснюється у кількох вимірах: перевіряється MAPE (формула (4)) та RMSE у лог-шкалі, аналізується покриття довірчих інтервалів і виконується калібрування «факт на прогноз» (модель (5)) окремо в кожній страті з подальшим зваженням агрегуванням. Фінальний звіт містить стратифіковані оцінки α , таблиці локальних $\hat{s}$ з 95% CI, теплокарти $\hat{\kappa}$, а також узгоджені рекомендації щодо поєднань технік з огляду на очікуваний вплив на LCP_{p95}/INP_{p95} і трудовитрати впровадження.

Отримані параметри є контекстно залежними і можуть змінюватися під впливом контенту та архітектурних рішень. Суттєві редизайни, зміна типу LCP-елемента або перегляд політик кешування здатні зсувати як частки α , так і локальні прискорення s , тому параметри варто переоцінювати після вагомих змін і відстежувати дрейф у часі. На результати впливають умови оточення – півторагодинні коливання мережі, маршрутизація CDN, паралельні релізи – тож бажано фіксувати часові та інфраструктурні коваріати, використовувати контрольні вікна та за необхідності застосовувати кластеризацію стандартних похибок [15].

Ідентифікація взаємодій обмежується статистичною потужністю та планом експерименту. Дробові проекти вимагають ретельної перевірки аліасів, а у випадку дефіциту вибірки доцільно звужувати простір взаємодій до найбільш імовірних або застосовувати регуляризацию з інформативними апіорі (κ поблизу 1 для очевидно незалежних пар). Додаткову варіативність вносить гетерогенність пристроїв (тротлінг, термічні обмеження), що особливо відчутно для INP; тому класи пристроїв мають бути чітко визначені, а стабільність оцінок – перевірена у часі. Усі ці чинники означають, що параметри (α, s, κ) слід розглядати як локальні для конкретного продукту та середовища; переносимість на інші проекти або періоди повинна підтверджуватися окремими валідаційними вимірюваннями й калібруванням [20].

Запропонований виклад основного матеріалу формує завершену методологічну лінію від формалізації багаторесурсної моделі до статистичної ідентифікації параметрів і валідації якості прогнозів. Базова рівновага між простотою (модель (1)) і реалістичністю (взаємодії (2)) забезпечує пояснюваність та сумісність із практикою факторних експериментів. Регресійна постановка (3) у лог-просторі перцентилів надає прямі, інтерпретовані оцінки локальних прискорень і взаємодій, а блок якості (4)–(5) гарантує контроль похибок і коректну калібрування під польові умови. За рахунок стратифікації, відмовостійких статистичних процедур і чітких критеріїв звітності отримані параметри (α, s, κ) стають придатними для подальшого використання у задачах перцентильного прогнозування та обґрунтованого планування оптимізацій у CI-процесах великих фронтенд-систем.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ МЕТОДИКИ

Емпірична перевірка методики спрямована на демонстрацію коректності операціоналізації параметрів багаторесурсної моделі, значущості та стабільності взаємодій оптимізацій у присутності реального шуму середовища, а також на оцінювання прогностичної якості на рівні перцентилів за поза-вибірковим тестом із прозорими метриками похибки та калібруванням «факт → прогноз». Для ілюстрації повного циклу – від збору даних і стратифікації до порівняння прогностичних і фактичних значень LCP_{p95} та INP_{p95} – використано два репрезентативні користувацькі маршрути: сторінку з великим hero-зображенням і списковий

інтерфейс з інтенсивною клієнтською логікою. Стратифікація здійснювалася за класом пристрою (low/mid), типом мережі (3G/4G) та станом кешу (cold/warm), що забезпечило вісім комбінацій середовища для аналізу. План факторного експерименту мав форму 2^3 із трьома бінарними техніками: сучасні формати зображень із lazy decode (B), скорочення JS-бандла та dead-code elimination (C), а також preconnect/dns-prefetch до критичних ориджинів (E). Для кожної комірки дизайну збиралося по 150–200 валідних сесій у полі (RUM), додатково виконувалися контрольовані лабораторні прогони для калібрування трас; сумарний обсяг становив близько 11–12 тис. сесій на кейс, із балансом за стратами та рандомізованим порядком запусків [21].

Нормований розклад часу в базовій конфігурації визначався за Chrome trace/HAR із агрегуванням подій до етапів «мережа», «JS/CPU», «рендер», «інше». Для страт low/3G/cold у маршруті з hero-зображенням медіанні частки дорівнювали приблизно $\alpha_{\text{мережа}} \approx 0,41$, $\alpha_{\text{JS/CPU}} \approx 0,33$, $\alpha_{\text{рендер}} \approx 0,21$, $\alpha_{\text{інше}} \approx 0,05$; для mid/4G/warm відповідні значення становили $\alpha_{\text{мережа}} \approx 0,31$, $\alpha_{\text{JS/CPU}} \approx 0,36$, $\alpha_{\text{рендер}} \approx 0,25$, $\alpha_{\text{інше}} \approx 0,08$. Сума часток у кожній страті дорівнювала одиниці з відхиленням не більш як $\pm 0,01$, A/A-фази засвідчили стабільність α у межах ± 3 –4% відносно протягом тижневих зрізів, що відповідає припущенням базової моделі (1) про повільну змінність структури часу за відсутності суттєвих змін контенту (рисунок 1).

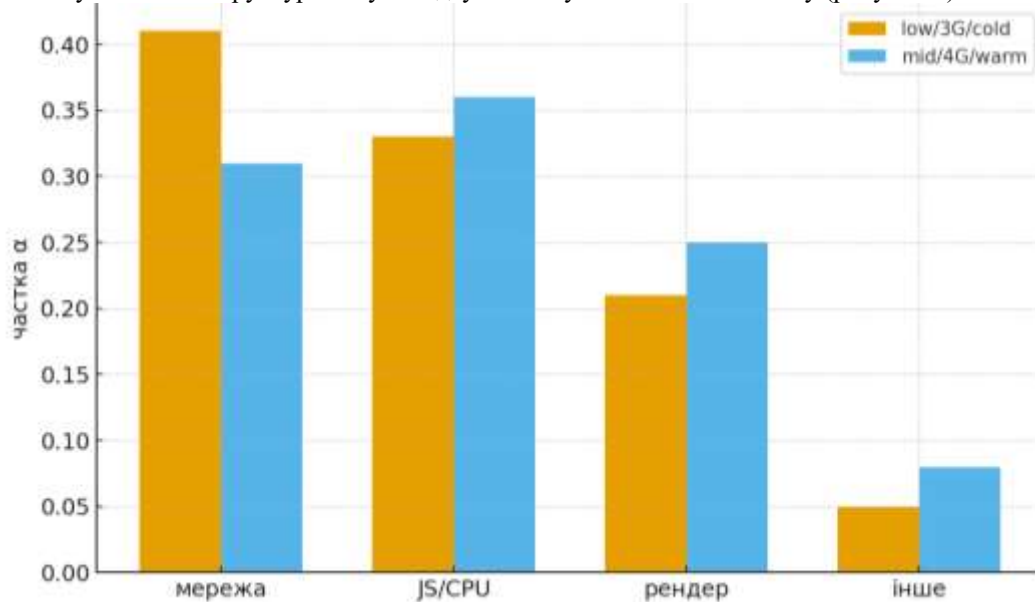


Рис. 1. Розклад базового часу за етапами (hero route)

Локальні множники прискорення ідентифікувалися двома взаємодоповнювальними шляхами. У лабораторних прогонах використовувалася схема «увімкнено/вимкнено» з фіксацією підетапів у трасі: для техніки B отримано $\hat{s}_{\text{мережа}+\text{decode}} \approx 1,30$ –1,36 (95% CI у межах 1,25–1,43), для C – $\hat{s}_{\text{JS/CPU}} \approx 1,35$ –1,45 (CI 1,27–1,55), для E – $\hat{s}_{\text{мережа}/\text{TTFB}} \approx 1,08$ –1,15 (CI 1,04–1,19). На польових даних застосовувалася процедура difference-in-differences із коваріатами середовища; отримані оцінки узгоджувалися з лабораторними і розташовувалися в середині їхніх довірчих інтервалів. Додаткова перевірка через квантили локальних процесів (наприклад, P90 часу декодування зображення) підтвердила відповідність $\hat{s}$ перцентильним зсувам підетапів (рисунок 2).

Наявність неадитивності ефектів було досліджено на основі регресійної моделі в лог-просторі перцентилів (3), де $\log(P95)$ представлялося як функція бінарних факторів і їхніх попарних взаємодій із контрольними змінними страт [22]. Для маршруту hero статистично значущими виявилися взаємодії B×C та B×E: перша відповідала суперадитивності з оцінкою $\hat{\kappa}_{BC} \approx 0,92$ (95% CI 0,88–0,96), що інтерпретується як додатковий виграш при сумісному застосуванні сучасних форматів зображень і скорочення JS; друга вказувала на легке перекриття з $\hat{\kappa}_{BE} \approx 1,04$ (CI 1,00–1,09), узгоджене з тим, що зменшення обсягу ресурсу послаблює маржинальний ефект попереднього встановлення з'єднання. Для спискового маршруту взаємодія C×E наближалася до нейтральної ($\hat{\kappa}_{CE} \approx 0,99$, CI 0,95 – 1,03), тоді як B×C залишалася статистично значущою та сприятливою. Таким чином, поправка на взаємодії в узагальненій моделі (2) є релевантною і підвищує адекватність прогнозів у порівнянні з суто адитивним підходом (1) (рисунок 3).

Композиція оцінених α , s і κ застосовувалася у двох режимах – за «локальним» наближенням (1) для одиничної техніки та за скоригованою моделлю (2) для пакета змін. Для hero-маршруту базове значення LCP_{P95} у stratum low/3G/cold становило близько 3100 мс. Пакет B+C+E забезпечував очікуване відносне зменшення $T_{\text{rel}} \approx 0,81$ і прогноз $\widehat{LCP}_{P95} \approx 2510$ мс (95% CI 2380 – 2650 мс). Фактичний перцентиль, виміряний у польових умовах на валідаційному відрізку, дорівнював 2560 мс, що відповідає модулю похибки 1,9% і вкладається в довірчий інтервал. Для спискового маршруту базовий INP_{P95} у low/3G/cold дорівнював

приблизно 260 мс; пакет С+Е дав прогноз 212–218 мс залежно від страти з фактичним значенням 219 мс, що демонструє високу узгодженість оцінок у присутності помірного мережевого шуму (рисунок 4).

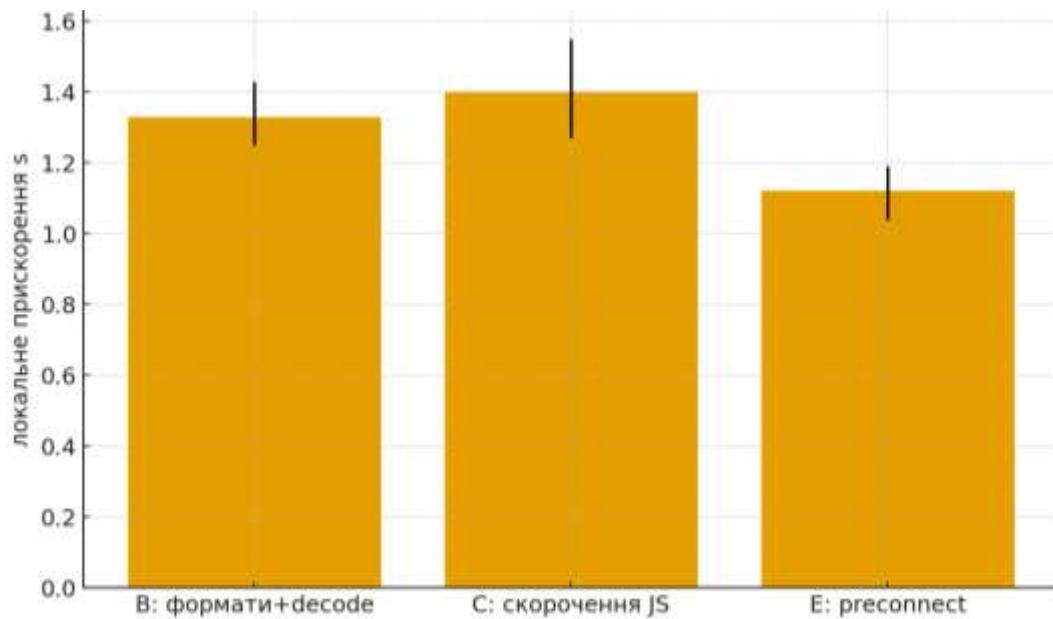


Рис. 2. Оцінки локальних прискорень із 95% CI

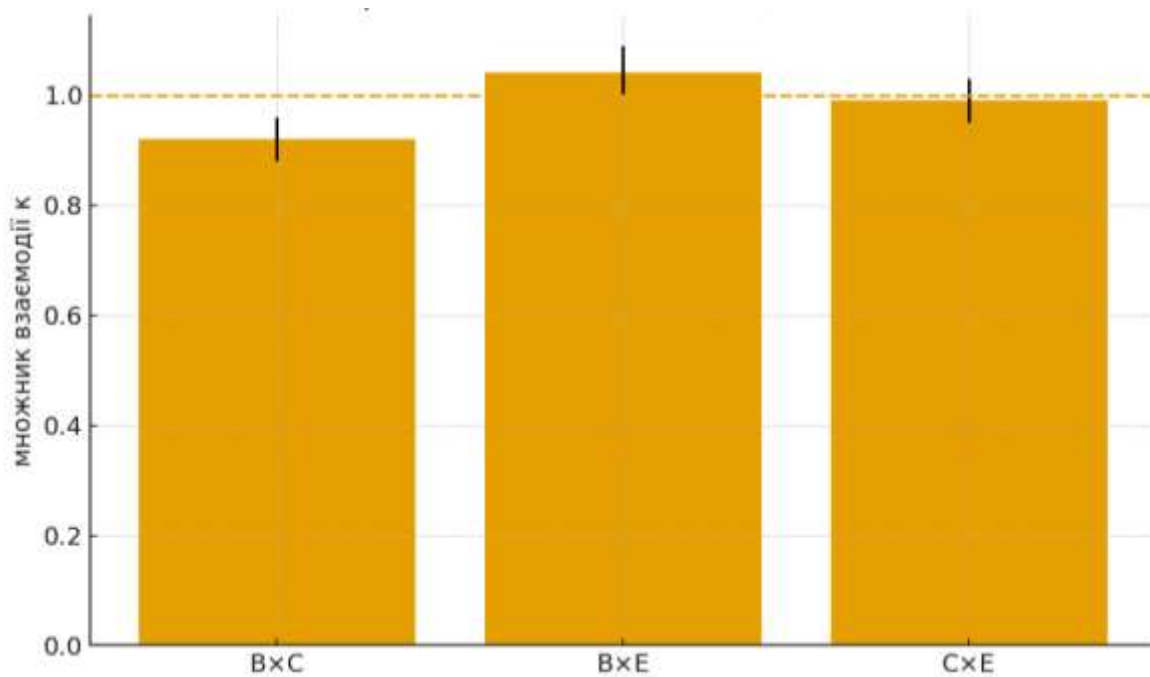


Рис. 3. Попарні взаємодії оптимізацій із 95% CI

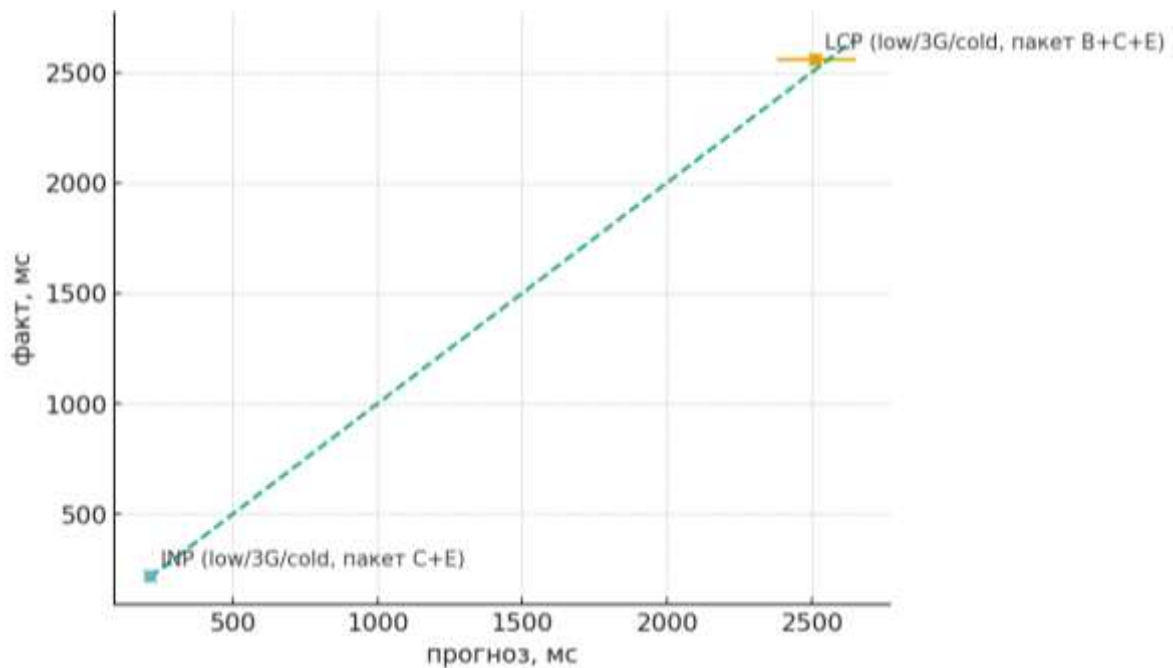


Рис. 4. Прогноз проти факту (із 95% СІ для прогнозу)

Поза-вибіркова перевірка виконувалася на відкладених даних із розбиттям «train/validation» за комірками дизайну та часовими зрізами. Для LCP_{p95} середньозважена MAPE (4) по втратах становила 5,9% на його-маршруті та 6,7% на списковому; для INP_{p95} – 7,8% і 8,5% відповідно. Значення RMSE у лог-шкалі підтверджували відсутність систематичних «проколів» у хвості розподілу. Калібрування «факт → прогноз» (5) для кожної втрати дало інтерсепт, близький до нуля, та нахил β у межах 0,96–1,02; 95% довірчі інтервали включали одиницю, що свідчить про збереження масштабу та відсутність істотних зміщень. Покриття 95% довірчих інтервалів прогнозів становило 91–94% залежно від втрати, тобто було близьким до номінального рівня з урахуванням обмеженого розміру вибірки в окремих комірках.

Аналіз чутливості проводився у трьох вимірах. По-перше, заміна медіан у визначенні α на зважені тримінговані середні (10–20% тримінгу) змінювала оцінки часток та похідні прогнози в межах 1–2%, що не впливало на ранжування пакетів. По-друге, вилучення взаємодій ($\kappa \equiv 1$) із регресійної моделі (3) збільшувало MAPE для LCP_{p95} на 1,5–2,1 п.п., а для INP_{p95} – на 0,8–1,3 п.п., що підтверджує користь явного моделювання неадитивності. По-третє, зміна роздільності дробового плану засвідчила стійкість головних ефектів у межах стандартних похибок і зникнення статистичної значущості для невеликих попарних взаємодій у малих вибірках, що узгоджується з очікуваними вимогами до потужності експерименту.

Зовнішня узгодженість і переносимість параметрів оцінювалися порівнянням між близькими релізами того самого продукту та між продуктами з відмінним критичним шляхом. Частки α продемонстрували високу стабільність у межах продукту за відсутності значних змін контенту, водночас перенос параметрів на інший продукт призводив до зростання MAPE на 2–3 п.п. без додаткового локального калібрування. Локальні прискорення s і взаємодії κ виявилися чутливішими до архітектурних особливостей маршруту; повторна оцінка на мінімальному наборі комбінацій повертала показники точності до базового рівня. Ці спостереження узгоджуються з уявленням про «локальний» характер параметрів і потребу періодичної перевірки після суттєвих змін макета або ланцюжка доставки контенту.

Узагальнюючи результати, багаторесурсна модель (1), доповнена попарними взаємодіями (2) та оцінена регресією в лог-просторі перцентилів (3), забезпечує пояснювані й відтворювані прогнози LCP_{p95} і INP_{p95} у різних втратах середовища з типовими похибками у межах 6–9% для перцентильних метрик і коректною калібровкою «факт → прогноз». Аналіз чутливості підтверджує важливість явного моделювання взаємодій, а стабільність α між близькими релізами спрощує підтримку моделі в часі. З урахуванням наведених оцінок методика може розглядатися як придатна основа для перцентильного прогнозування впливу пакетів оптимізацій та формування дорожніх карт покращень у CI-циклах великих фронтенд-систем.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Представлене дослідження обґрунтовує відтворювану методику емпіричного оцінювання параметрів узагальненого закону Амдала для веб-інтерфейсів з орієнтацією на перцентильні UX-метрики. Запропоновано

цілісний конвеєр: побудову багаторесурсної моделі з частками етапів α , оцінювання локальних прискорень для технік оптимізації, урахування неадитивності через множники взаємодій κ , а також регресійну ідентифікацію у лог-просторі перцентилів із подальшою перевіркою якості (MAPE, RMSE у лог-шкалі) та калібрування «факт $\rightarrow$ прогноз». Методика показує узгодженість між лабораторними оцінками і польовими вимірюваннями, забезпечує пояснюваність і придатна до використання у промислових CI-циклах.

Емпіричні результати свідчать, що частки α у базовому стані демонструють помірну стабільність у межах близьких релізів і суттєво відрізняються між стратами середовища (пристрій, мережа, стан кешу), що підтверджує доцільність стратифікації. Локальні прискорення s для типових технік (формати зображень із lazy decode, скорочення JS-бандла, preconnect/dns-prefetch) узгоджуються між синтетичними й польовими оцінками за квантилами підетапів, а попарні взаємодії κ мають відчутний практичний ефект: суперадитивність для поєднання оптимізацій з різним ресурсним профілем і субадитивність для частково перекривних впливів. На поза-вибіркових даних продемонстровано типові похибки у межах 6–9% для LCP_{p95}/INP_{p95} з коректною калібрування масштабу (нахил близький до одиниці й інтерсепт, наближений до нуля), що є достатнім для побудови дорожніх карт оптимізацій за принципом «виграш/вартість».

Практична значущість полягає у перетворенні набору розрізнених технік на структурований простір рішень із кількісно передбачуваним ефектом на перцентильні метрики. Отримані оцінки (α, s, κ) можуть слугувати вхідними параметрами для автоматизованих пайплайнів планування: прогнозу очікуваного зменшення LCP_{p95} і INP_{p95} під пакетами змін, пріоритизації із врахуванням вартості впровадження, а також контролю дрейфу параметрів у часі. Застосування у CI дозволяє знижувати ризик «дорогих і малоефективних» ініціатив, погоджувати план робіт між командами та підвищувати відтворюваність результатів.

Обмеження дослідження зумовлені контекстною природою параметрів і залежністю від архітектури продукту, контенту й умов середовища. Переносимість оцінок між проектами обмежена та потребує локальної валідації, зокрема після змін у критичному шляху рендерингу або ланцюжку доставки контенту. Ідентифікація слабких взаємодій вимагає достатньої статистичної потужності експериментального плану; дробові схеми потребують контролю роздільності, щоб уникнути аліасів між головними ефектами та критичними взаємодіями. Додатковим чинником є гетерогенність пристроїв і мережеві флуктуації, що зумовлює необхідність стратифікації, кластер-завадостійких оцінок і регулярного калібрування.

Перспективи подальших розвідок окреслюються у кількох напрямках. По-перше, доцільним є розширення моделі взаємодій за межі попарних термів: обережне введення вищих порядків за наявності відповідної потужності або байєсівська регуляризація з інформативними апіорі. По-друге, перспективним видається ієрархічне моделювання з частковим «поділом статистичної сили» між маршрутами та продуктами, що підвищить переносимість і зменшить дисперсію оцінок у малих стратах. По-третє, корисним є інтегрування причинно-наслідкових підходів для реальних умов noncompliance (instrumental variables, robust DiD), а також автоматичної стратифікації за клієнтськими сигналами (Client Hints, тип взаємодії, профіль long tasks). По-четверте, варто розширити цільові метрики поза LCP та INP – наприклад, адаптувати підхід до CLSi доменно-специфічних показників чутливості інтерфейсу. По-п'яте, доцільно розробити надбудову у вигляді CI-плагіна рекомендацій, що поєднує поточні оцінки (α, s, κ) із бюджетом і ризиками та використовує онлайн-навчання для активного відбору наступних експериментів. Нарешті, цінним є формування відкритих шаблонів даних, еталонних трас і реплікованих сценаріїв вимірювання, які спростять міжпроектні порівняння і пришвидшать крос-перевірку результатів спільнотою.

У підсумку, сформована методична основа для емпіричного оцінювання параметрів узагальненого закону Амдала доводить практичну придатність підходу для перцентильного прогнозування та планування оптимізацій у великих фронтенд-системах. Подальший розвиток у бік ієрархічних, байєсівських і онлайн-рішень, а також глибшої інтеграції з інструментами CI/CD, здатен забезпечити вищу точність, кращу переносимість і швидший цикл прийняття інженерних рішень у промислових умовах.

Література

1. Common misconceptions about how to optimize LCP [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://web.dev/blog/common-misconceptions-lcp/>
2. Prus, O., & Maidaniuk, V. (2025). Optimising web interface performance using Amdahl's law. Bulletin of Cherkasy State Technological University, 30(2), 88-96. <https://doi.org/10.62660/bcstu/2.2025.88>
3. Why lab and field data can be different (and what to do about it) [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://web.dev/articles/lab-and-field-data-differences>
4. Poola, C., & Saxena, R. (2021). On Extending Amdahl's Law to Learn Computer Performance. arXiv preprint arXiv:2110.07822. <https://arxiv.org/abs/2110.07822>
5. Malavolta, I., Chinnappan, K., Jasmontas, L., Gupta, S., & Karam Soltany, K. A. (2020). Evaluating the Impact of Caching on the Energy Consumption and Performance of Progressive Web Apps. In Proceedings of the IEEE/ACM 3rd International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MOBILESoft '20). <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3387905.3388593>

6. Interaction to Next Paint becomes a Core Web Vital on March 12 [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://web.dev/blog/inp-cwv-march-12>
7. Interaction to Next Paint (INP) [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://web.dev/articles/inp>
8. Largest Contentful Paint (W3C Working Draft) [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://www.w3.org/TR/largest-contentful-paint/>
9. Optimize Largest Contentful Paint [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://web.dev/articles/optimize-lcp>
10. Common misconceptions about how to optimize LCP [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://web.dev/blog/common-misconceptions-lcp>
11. RUM vs. synthetic monitoring [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Performance/Guides/Rum-vs-Synthetic>
12. Sullivan, A. (2023). Digging through Chrome traces: an introduction with an example. Web Performance Calendar 2023. [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://calendar.perfplanet.com/2023/digging-chrome-traces-introduction-example/>
13. Trace Event Format [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://docs.google.com/document/d/1CvAClvFfyA5R-PhYUmn500QYtMH4h6I0nSsKchNaySU/preview>
14. Rel="preconnect" – HTML attribute [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML/Reference/Attributes/rel/preconnect>
15. Assist the browser with resource hints [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://web.dev/learn/performance/resource-hints>
16. Zizzamia, L. (2020). Resource Hints. The Web Almanac by HTTP Archive. [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://almanac.httparchive.org/en/2020/resource-hints>
17. Osmani, A. (2021). Using Modern Image Formats: AVIF And WebP. Smashing Magazine. [Електронний Ресурс]. Назва з екрану. <https://www.smashingmagazine.com/2021/09/modern-image-formats-avif-webp/>
18. Blackwell, M., & Pashley, N. E. (2023). Noncompliance and Instrumental Variables for 2^K Factorial Experiments. Journal of the American Statistical Association, 118(542), 1102–1114. <https://doi.org/10.1080/01621459.2021.1978468>
19. Prus, O. V., Maidanyuk, V. P., & Arsenyuk, I. R. (2024, March). Analysis of tools for managing multi-project environments: optimization of software development. NaukPratsi VNTU, (1), 29–36. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-1-29-36>
20. Menges, R., Staab, S., Schaefer, C., & Walber, T. (2025, February). What did my users experience? Discovering visual stimuli on graphical user interfaces of the Web. ACM Transactions on the Web, 19(2). <https://doi.org/10.1145/3715881>
21. Mitton, L. (2023, November). Amdahl's law: understanding the basics. Retrieved from https://www.splunk.com/en_us/blog/learn/amdahls-law.html
22. Nair, A. M., CK, S., Sidharth, S., & KK, V. (2024, April). Dockerized application with web interface. International Journal of Scientific Research in Computer Science Engineering and Information Technology, 10(2), 412–419. <https://doi.org/10.32628/CSEIT243646>
23. Oh, S., Kwon, Y., & Lee, J. (2025). Optimizing real-time object detection in a multi-neural processing unit system. Sensors, 25(5), 1376. <https://doi.org/10.3390/s25051376>
24. Felani, R., Al-Azam, M. N., Adi, D. P., & Widodo, A. (2020, July). Optimizing virtual resources management using Docker on cloud applications. IJCCS (Indonesian Journal of Computing and Cybernetics Systems, 14(3), 319. <https://doi.org/10.22146/ijccs.57565>
25. Abounacer, R., Afdel, K., & Bouaouda, A. (2023, September 1). Resource utilization and cost implications of container live migration in clouds: An approach performed on Amazon Web Services (AWS). Computer Systems and Vision Laboratory, Department of Computer Science, Faculty of Sciences, Ibn Zohr University, Agadir, Morocco.

References

1. Common misconceptions about how to optimize LCP. URL: <https://web.dev/blog/common-misconceptions-lcp/>
2. Prus, O., & Maidaniuk, V. (2025). Optimising web interface performance using Amdahl's law. Bulletin of Cherkasy State Technological University, 30(2), 88–96. <https://doi.org/10.62660/bcstu.2.2025.88>
3. Why lab and field data can be different (and what to do about it). URL: <https://web.dev/articles/lab-and-field-data-differences>
4. Poola, C., & Saxena, R. (2021). On Extending Amdahl's Law to Learn Computer Performance. arXiv preprint arXiv:2110.07822. URL: <https://arxiv.org/abs/2110.07822>
5. Malavolta, I., Chinnappan, K., Jasmontas, L., Gupta, S., & Karam Soltany, K. A. (2020). Evaluating the Impact of Caching on the Energy Consumption and Performance of Progressive Web Apps. In Proceedings of the IEEE/ACM 3rd International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MOBILESoft '20). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3387905.3388593>
6. Interaction to Next Paint becomes a Core Web Vital on March 12. URL: <https://web.dev/blog/inp-cwv-march-12>
7. Interaction to Next Paint (INP). URL: <https://web.dev/articles/inp>

8. Largest Contentful Paint (W3C Working Draft). URL: <https://www.w3.org/TR/largest-contentful-paint/>
9. Optimize Largest Contentful Paint. URL: <https://web.dev/articles/optimize-lcp>
10. Common misconceptions about how to optimize LCP. URL: <https://web.dev/blog/common-misconceptions-lcp>
11. RUM vs. synthetic monitoring. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Performance/Guides/Rum-vs-Synthetic>
12. Sullivan, A. (2023). Digging through Chrome traces: an introduction with an example. Web Performance Calendar 2023. URL: <https://calendar.perfplanet.com/2023/digging-chrome-traces-introduction-example/>
13. Trace Event Format. URL: <https://docs.google.com/document/d/1CvAClvFfyA5R-PhYUmn5O0QtYMH4h6I0nSsKchNAYsU/preview>
14. rel="preconnect" – HTML attribute. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML/Reference/Attributes/rel/preconnect>
15. Assist the browser with resource hints. URL: <https://web.dev/learn/performance/resource-hints>
16. Zizzamia, L. (2020). Resource Hints. The Web Almanac by HTTP Archive. URL: <https://almanac.httparchive.org/en/2020/resource-hints>
17. Osmani, A. (2021). Using Modern Image Formats: AVIF and WebP. Smashing Magazine. URL: <https://www.smashingmagazine.com/2021/09/modern-image-formats-avif-webp/>
18. Blackwell, M., & Pashley, N. E. (2023). Noncompliance and Instrumental Variables for 2^K Factorial Experiments. Journal of the American Statistical Association, 118(542), 1102–1114. <https://doi.org/10.1080/01621459.2021.1978468>
19. Prus, O. V., Maidanyuk, V. P., & Arsenyuk, I. R. (2024, March). Analysis of tools for managing multi-project environments: optimization of software development. Naukovi Pratsi VNTU, (1), 29–36. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-1-29-36>
20. Menges, R., Staab, S., Schaefer, C., & Walber, T. (2025, February). What did my users experience? Discovering visual stimuli on graphical user interfaces of the Web. ACM Transactions on the Web, 19(2). <https://doi.org/10.1145/3715881>
21. Mitton, L. (2023, November). Amdahl's law: understanding the basics. URL: https://www.splunk.com/en_us/blog/learn/amdahls-law.html
22. Nair, A. M., CK, S., Sidharth, S., & KK, V. (2024, April). Dockerized application with web interface. International Journal of Scientific Research in Computer Science Engineering and Information Technology, 10(2), 412–419. <https://doi.org/10.32628/CSEIT243646>
23. Oh, S., Kwon, Y., & Lee, J. (2025). Optimizing real-time object detection in a multi-neural processing unit system. Sensors, 25(5), 1376. <https://doi.org/10.3390/s25051376>
24. Felani, R., Al-Azam, M. N., Adi, D. P., & Widodo, A. (2020, July). Optimizing virtual resources management using Docker on cloud applications. IJCCS (Indonesian Journal of Computing and Cybernetics Systems), 14(3), 319. <https://doi.org/10.22146/ijccs.57565>
25. Abounacer, R., Afdel, K., & Bouaouda, A. (2023, September 1). Resource utilization and cost implications of container live migration in clouds: An approach performed on Amazon Web Services (AWS). Technical report, Computer Systems and Vision Laboratory, Department of Computer Science, Faculty of Sciences, Ibn Zohr University, Agadir, Morocco.