

**Politechnika Wrocławskaw
Wydział Informatyki i Telekomunikacji**

Kierunek: **Informatyka Stosowana (IST)**
Specjalność: **Inżynieria Oprogramowania (IO)**

**PRACA DYPLOMOWA
MAGISTERSKA**

**Porównanie wybranych mechanizmów
programowania współbieżnego i
równoległego w językach Rust i C++**

**Comparison of selected concurrent and
parallel programming mechanisms in
Rust and C++**

Rafał Jasiński

Opiekun pracy
dr inż. Zdzisław Spławska

Streszczenie

TEMPLATE Praca skupia się na projekcie i implementacji aplikacji wykorzystującej algorytmy genetyczne wraz z ich wizualizacją. Pierwsza część obejmuje teoretyczne podstawy tych algorytmów, porównując je do mechanizmów biologicznej genetyki. Omówiono schemat działania, historię oraz kluczowe elementy, takie jak osobnik, populacja, selekcja, krzyżowanie, mutacja i funkcja celu. Następnie przedstawiono założenia projektowe, obejmujące kodowanie osobnika, metody selekcji, operatory krzyżowania, opcje mutacji, funkcję celu, interfejs użytkownika, przykład użycia i strukturę aplikacji. Zawierają one opis ich zasad działania.

Implementacja aplikacji została opisana w kolejnym etapie, prezentując użyte technologie, wybrany język programowania wraz z interfejsem użytkownika i inne narzędzia. Szczegółowo omówiono implementację osobnika w kodowaniu binarnym, wybór wariantów operacji, metody selekcji, krzyżowania, mutacji, funkcji przystosowania oraz wygląd interfejsu użytkownika wraz z opisem.

Analiza wyników pracy obejmuje testy na danych testowych oraz porównanie różnych metod selekcji, krzyżowania i mutacji. Wnioski z porównań są przedstawione dla każdej badanej metody, dostarczając czytelnikowi kompleksowego spojrzenia na skuteczność poszczególnych elementów algorytmów genetycznych.

Całość pracy zawiera podsumowanie, gdzie prezentowane są główne osiągnięcia oraz wnioski podczas pisania pracy. Praca dostarcza wartościowego spojrzenia na zastosowanie algorytmów genetycznych w projektowaniu aplikacji, a także oferuje praktyczne wskazówki dotyczące implementacji i optymalizacji tych algorytmów.

Abstract

TEMPLATE The thesis focuses on the design and implementation of an application utilizing genetic algorithms along with their visualization. The first part covers the theoretical foundations of these algorithms, comparing them to the mechanisms of biological genetics. The operation scheme, history, and key elements such as individual, population, selection, crossover, mutation, and fitness function are discussed. The design assumptions are then presented, including individual encoding, selection methods, crossover operators, mutation options, the fitness function, user interface, usage example, and application structure. They contain a description of their principles of operation.

The application implementation is described in the next stage, presenting the technologies used, the chosen programming language along with the user interface, and other tools. The implementation of the individual in binary encoding, the selection of operation variants, selection methods, crossover, mutation, fitness function, and the appearance of the user interface are discussed in detail.

The results analysis includes tests on test data and a comparison of different selection, crossover, and mutation methods. Conclusions from the comparisons are presented for each investigated method, providing the reader with a comprehensive view of the effectiveness of individual elements of genetic algorithms.

The entire thesis includes a conclusion where the main achievements and conclusions drawn during the writing process are presented. The paper provides a valuable perspective on the application of genetic algorithms in application design and also offers practical guidance on the implementation and optimization of these algorithms.

Spis treści

1. Wstęp	7
1.1. Cel oraz zakres pracy	7
1.2. Problem badawczy	7
1.3. Struktura pracy	8
1.4. Słownik wybranych pojęć	10
2. Wprowadzenie	12
2.1. Programowanie współbieżne	13
2.1.1. Mechanizmy realizujące współbieżność	13
2.1.2. Zastosowania programowania współbieżnego	13
2.1.3. Zalety programowania współbieżnego	14
2.1.4. Wady programowania współbieżnego	14
2.2. Programowanie równoległe	14
2.2.1. Zasady programowania równoległego	14
2.2.2. Zastosowanie programowania równoległego	15
2.2.3. Zalety programowania równoległego	15
2.2.4. Wady programowania równoległego	16
3. Przegląd literatury	17
3.0.1. Metodologia przeglądu literatury	17
3.0.2. Kryteria selekcji oraz wyłączenia	18
3.0.3. Baza Scopus	18
3.0.4. Baza Google Scholar	20
3.1. Porównanie Rust oraz C++	20
3.1.1. Bezpieczeństwo	21
3.1.2. Czas wykonania	21
3.1.3. Programowanie współbieżne oraz równoległe	22
3.2. Podsumowanie	23
3.2.1. Kierunki dalszych badań	27
4. Wybrane mechanizmy w języku Rust	28
4.1. Podejście do współbieżności i równoległości	28
4.1.1. Ownership oraz borrow	28
4.1.2. Nieustraszona współbieżność	29
4.1.3. Inteligentne wskaźniki (ang. <i>Smart Pointers</i>)	29
4.2. Programowanie współbieżne	32
4.2.1. Model własności pamięci	32
4.2.2. Biblioteki	32
4.2.3. Kanały	34
4.2.4. Asynchroniczność	37
4.3. Programowanie równoległe	38
4.3.1. Biblioteki	38
4.4. Mechanizmy wspólne dla współbieżności i równoległości	39

4.4.1. Wątki (std::thread)	39
4.4.2. Synchronizacja dostępu (Mutex, RwLock)	40
4.4.3. Wartości atomowe (Atomic*)	42
4.4.4. Bariery	42
5. Wybrane mechanizmy w języku C++	44
5.1. Programowanie współbieżne	44
5.1.1. Biblioteki i przestrzeń standardowa	44
5.1.2. Komunikacja między wątkami	45
5.1.3. Synchronizacja	45
5.1.4. Asynchroniczność	47
5.2. Programowanie równoległe	49
5.2.1. OpenMP - Open Multi-Processing	49
5.2.2. Intel TBB (Threading Building Blocks)	50
6. Założenia i metodologia porównania mechanizmów w językach Rust oraz C++	52
6.1. Programowanie współbieżne	52
6.1.1. Zarządzanie wątkami	52
6.1.2. Wydajność synchronizacji	52
6.1.3. Narzut bezpieczeństwa	52
6.1.4. Wybrane algorytmy do analizy	53
6.2. Programowanie równoległe	53
6.2.1. Wydajność obliczeniowa	53
6.2.2. Wydajność sprzętowa (GFLOP/s)	53
6.2.3. Zasoby systemowe	53
6.2.4. Wybrane algorytmy do analizy	53
6.3. Metodologia badań	55
6.3.1. Środowisko testowe	55
6.3.2. Procedura testowa	55
6.3.3. Narzędzia pomiarowe	55
7. Porównanie międzyjęzykowe - programowanie równoległe	56
7.1. Implementacje w języku Rust	56
7.1.1. Struktura i organizacja kodu	56
7.1.2. Zarządzanie pamięcią	57
7.1.3. Mechanizmy równoległości	58
7.1.4. Specyfika benchmarku EP	59
7.1.5. Specyfika benchmarku CG	60
7.1.6. Specyfika benchmarku IS	63
7.2. Implementacje w C++ (OpenMP)	65
7.2.1. Struktura i organizacja kodu	65
7.2.2. Zarządzanie pamięcią	66
7.2.3. Mechanizmy równoległości	67
7.2.4. Specyfika benchmarku EP	68
7.2.5. Specyfika benchmarku CG	69
7.2.6. Specyfika benchmarku IS	72
7.3. Implementacje w C++ (TBB)	72
7.3.1. Struktura i organizacja kodu	72
7.3.2. Zarządzanie pamięcią	73
7.3.3. Mechanizmy równoległości	73
7.3.4. Specyfika poszczególnych benchmarków	74
7.4. Implementacje w C++ (nowoczesne podejście)	74

7.4.1. Struktura i organizacja kodu	74
7.4.2. Zarządzanie pamięcią	75
7.4.3. Mechanizmy równoległości	76
7.5. Porównanie między językowe	77
7.5.1. Architektura i organizacja kodu	77
7.5.2. Zarządzanie pamięcią	78
8. Porównanie między językowe - programowanie współbieżne	79
9. Analiza wyników - programowanie równoległe	80
9.1. Benchmark CG	81
9.1.1. Wyniki benchmarków - platforma ARM64	81
9.1.2. Wyniki benchmarków - platforma x86_64	87
9.1.3. Wyniki profilowania wydajności - platforma ARM64	92
9.1.4. Wyniki profilowania wydajności - platforma x86_64	96
9.1.5. Porównanie pomiędzy platformami	97
9.2. Benchmark EP	101
9.2.1. Wyniki benchmarków - platforma ARM64	101
9.2.2. Wyniki benchmarków - platforma x86_64	106
9.2.3. Wyniki profilowania wydajności - platforma ARM64	110
9.2.4. Wyniki profilowania wydajności - platforma x86_64	112
9.2.5. Porównanie pomiędzy platformami	115
9.3. Benchmark IS	117
9.3.1. Wyniki benchmarków - platforma ARM64	118
9.3.2. Wyniki benchmarków - platforma x86_64	124
9.3.3. Wyniki profilowania wydajności - platforma ARM64	128
9.3.4. Wyniki profilowania wydajności - platforma x86_64	132
9.3.5. Porównanie pomiędzy platformami	134
10. Wnioski oraz rekomendacje	137
11. Podsumowanie	138
Spis rysunków	139
Spis tabel	142
Spis listingów	143
Bibliografia	145

Rozdział 1

Wstęp

1.1. Cel oraz zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie pogłębionej analizy oraz wszechstronnego porównania mechanizmów programowania współbieżnego i równoległego w dwóch językach programowania: Rust i C++. Celem jest przedstawienie kluczowych różnic oraz podobieństw w podejściu do zarządzania wielowątkowością, analizując jednocześnie efektywność, bezpieczeństwo oraz wygodę stosowania narzędzi dostępnych w obu językach.

W ramach pracy szczególną uwagę poświęcono omówieniu wybranych bibliotek i frameworków, które wspierają tworzenie aplikacji wielowątkowych w Rust (np. Tokio, Rayon) i C++ (np. std::thread, OpenMP, TBB). Przeanalizowane zostaną mechanizmy bezpieczeństwa oraz zarządzania pamięcią i wątkami, które odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu stabilności i wydajności aplikacji współbieżnych i równoległych.

Dodatkowym celem jest przeprowadzenie analizy wydajności oraz efektywności implementacji aplikacji wielowątkowych, co pozwoli na ocenę szybkości działania i efektywnego zarządzania zasobami w obu językach. Badanie uwzględnia również aspekty praktyczne, takie jak łatwość użycia narzędzi, dostępność wsparcia ze strony społeczności oraz dojrzałość ekosystemu każdego z języków.

Aby zilustrować wyniki teoretyczne w praktyce, przeprowadzona zostanie implementacja aplikacji współbieżnych i równoległych w obu językach, co umożliwi porównanie osiągniętych wyników wydajnościowych oraz analizę różnic w strukturze i stylu kodu. Efektem pracy będzie również identyfikacja scenariuszy, w których jeden z języków może przewyższać drugi pod względem wydajności, bezpieczeństwa, czy wygody stosowania, co pozwoli na sformułowanie rekomendacji dotyczących wyboru języka w zależności od specyficznych wymagań projektowych.

1.2. Problem badawczy

Wraz z rozwojem nowoczesnych technologii informatycznych i rosnącą złożonością systemów obliczeniowych, znaczenia nabierają paradygmaty programowania, które pozwalają na maksymalne wykorzystanie zasobów współczesnego sprzętu komputerowego — w szczególności architektur wielordzeniowych. Programowanie współbieżne i równoległe stanowią obecnie podstawę projektowania wydajnych i niezawodnych aplikacji w wielu obszarach, od systemów operacyjnych, przez serwery wysokiej dostępności, aż po rozwiązania z zakresu sztucznej inteligencji czy gier komputerowych.

W kontekście tych wyzwań szczególnie interesujące staje się porównanie narzędzi, jakie oferują współczesne języki programowania. Niniejsza praca magisterska koncentruje się na analizie

dwóch języków: Rust oraz C++, które - mimo odmiennej filozofii projektowej - są powszechnie wykorzystywane w systemach wymagających wysokiej wydajności. Rust, jako stosunkowo młody język [?], zdobywa coraz większą popularność[?] ze względu na nowatorskie podejście do bezpieczeństwa pamięci i współbieżności, opierające się na systemie własności ((ang. *ownership*)) oraz sprawdzaniu poprawności kodu na etapie komplikacji. Dzięki temu minimalizuje ryzyko wycieków pamięci, błędów synchronizacji czy wyścigów danych. Z kolei C++ - język dojrzały, o długiej historii i ugruntowanej pozycji w przemyśle - oferuje niezwykle szeroki wachlarz możliwości, jeśli chodzi o zarządzanie zasobami i niskopoziomową optymalizację, jednak często kosztem większego ryzyka błędów programistycznych.

Wybór tych dwóch języków podyktowany jest ich rosnącym znaczeniem w obszarach wymagających efektywnego zarządzania współbieżnością i równoległością. Rust jest promowany jako bezpieczna alternatywa dla C i C++ w systemach krytycznych [?], natomiast C++ nadal pozostaje filarem wielu aplikacji, w tym tych o kluczowym znaczeniu dla infrastruktury informatycznej. Porównanie ich możliwości w zakresie programowania współbieżnego i równoległego dostarcza cennych informacji dla praktyków inżynierii oprogramowania, projektantów systemów oraz badaczy eksplorujących nowe podejścia do zarządzania złożonością kodu.

W związku z powyższym, głównym problemem badawczym pracy są następujące pytania:

PB1: *Jakie są różnice i podobieństwa w podejściu do programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust oraz C++ pod względem efektywności, bezpieczeństwa oraz dostępnych narzędzi?*

PB2: *W jaki sposób wybór konkretnego języka wpływa na wydajność i stabilność aplikacji współbieżnych oraz równoległych?*

Odpowiedź na to pytanie zostanie udzielona poprzez analizę teoretyczną, przegląd literatury oraz eksperymentalne porównanie konkretnych mechanizmów oferowanych przez oba języki. W ramach pracy przeprowadzone zostaną testy wydajnościowe oraz analiza, które pozwolą na identyfikację różnic w podejściu do programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust oraz C++.

1.3. Struktura pracy

Struktura pracy została zaplanowana w sposób umożliwiający systematyczne przedstawienie zagadnienia oraz przeprowadzenie kompleksowej analizy porównawczej. Po niniejszym wprowadzeniu, rozdział drugi precyzuje cel oraz zakres pracy, określając, które aspekty mechanizmów współbieżności i równoległości będą poddane szczegółowej analizie. Następnie, w rozdziale trzecim, przedstawione zostały podstawowe pojęcia związane z programowaniem współbieżnym i równoległy - zarówno od strony teoretycznej, jak i praktycznej - w celu zbudowania wspólnego kontekstu dla dalszych rozważań.

Rozdział czwarty zawiera przegląd literatury oraz wcześniejszych badań dotyczących wykorzystania języków Rust i C++ w projektowaniu systemów wielowątkowych. Zidentyfikowano w nim również istniejące luki badawcze oraz przedstawiono różnice w podejściu do bezpieczeństwa, wydajności i zarządzania pamięcią.

W dalszej części pracy - odpowiednio w rozdziałach piątym i szóstym - zaprezentowano konkretne mechanizmy programowania współbieżnego i równoległego dostępne w językach Rust oraz C++. Każdy z tych rozdziałów zawiera szczegółowe omówienie modeli pamięci, używanych bibliotek (np. Tokio, Rayon, std::thread, OpenMP), metod synchronizacji (mutexy, kanały, wartości atomowe), a także wybranych konstrukcji językowych wspierających bezpieczne współdzielenie danych między wątkami.

W rozdziale siódmym dokonano bezpośredniego porównania omawianych mechanizmów, koncentrując się na takich kryteriach jak zarządzanie wątkami, efektywność synchronizacji, narzut związany z bezpieczeństwem, a także wydajność obliczeniowa i sprzętowa.

Rozdział ósmy poświęcony jest analizie wyników eksperymentów, w ramach których porównano działanie wybranych algorytmów zaimplementowanych w obu językach, ze szczególnym uwzględnieniem czasów wykonania, zużycia zasobów oraz stabilności działania.

W końcowej części pracy, rozdział dziewiąty prezentuje wnioski oraz rekomendacje dotyczące praktycznego zastosowania języków Rust i C++ w projektach wymagających wysokiej wydajności i bezpieczeństwa współbieżnego. Pracę zamyka rozdział dziesiąty, który podsumowuje najważniejsze osiągnięcia badawcze oraz wskazuje możliwe kierunki dalszych analiz i rozwijania zaproponowanych rozwiązań.

1.4. Słownik wybranych pojęć

- **licznik Redis** - to mechanizm wykorzystujący bazę danych Redis do przechowywania i aktualizowania liczników w czasie rzeczywistym. Redis, jako szybka baza typu klucz-wartość, pozwala na błyskawiczne operacje inkrementacji i dekrementacji wartości przypisanej do danego klucza.
- **LLVM** - (ang. *Low Level Virtual Machine*) - to zestaw narzędzi i bibliotek do budowania kompilatorów, który umożliwia generowanie, analizę i optymalizację kodu (zarówno w czasie komplikacji, jak i wykonania). LLVM nie jest maszyną wirtualną w tradycyjnym sensie, ale raczej infrastrukturą kompilatora, która operuje na pośrednim języku reprezentacji (LLVM IR), z którego może generować kod maszynowy dla różnych architektur.
- **nieustraszona współbieżność** - (ang. *fearless concurrency*) - to podejście do programowania współbieżnego, które eliminuje problemy związane z bezpieczeństwem pamięci i synchronizacją wątków. W Rust osiągnięto to dzięki systemowi własności, który zapewnia, że dane mogą być modyfikowane tylko przez jeden wątek na raz, eliminując ryzyko wyścigów danych i błędów synchronizacji.
- **odwołania do nieobecnych stron** - (ang. *page fault*) - zdarzenie w systemie operacyjnym, które występuje, gdy program próbuje uzyskać dostęp do strony pamięci, która nie znajduje się obecnie w pamięci RAM. Może to skutkować koniecznością załadowania tej strony z dysku (np. z pliku wymiany), co wpływa na wydajność programu.
- **zwolnienie stron pamięci** - (ang. *page reclaims*) - operacje systemowe polegające na odzyskiwaniu już załadowanych, ale nieaktywnych stron pamięci, aby umożliwić ich ponowne wykorzystanie przez inne procesy. Pomaga to zoptymalizować wykorzystanie pamięci fizycznej bez konieczności natychmiastowego odwoływanego się do pamięci wirtualnej.
- **pożyczanie** (ang. *borrow*) - również występujący pod inną nazwą jako przenoszenie własności [21], jest to mechanizm pozwalający na używanie wartości bez przejmowania jej na własność. Dzięki temu możemy przekazywać dane do funkcji lub między częściami programu bez ich kopiowania czy przenoszenia.
- **proces** - to instancja programu, która jest wykonywana w systemie operacyjnym. Procesy są izolowane od siebie i mają własne zasoby, takie jak pamięć i przestrzeń adresowa.
- **programowanie równolegle** - to sposób wykonywania wielu zadań jednocześnie, co zwiększa wydajność programu. W odróżnieniu od programowania współbieżnego, programowanie równolegle polega na wykonywaniu zadań w tym samym czasie, a nie przeplataniu ich w czasie.
- **programowanie współbieżne** - technika programistyczna polegająca na jednoczesnym wykonywaniu wielu zadań lub ich przeplataniu w czasie, mająca na celu zwiększenie efektywności działania programu. Współbieżność może być realizowana z wykorzystaniem wielu wątków, procesów bądź mechanizmów programowania asynchronicznego, które wewnętrznie mogą operować na wątkach lub innych zasobach udostępnianych przez system operacyjny.
- **SIMD** - (ang. *Single Instruction, Multiple Data*) - pojedyncza instrukcja wykonywana na wielu danych jednocześnie. Jest to technika optymalizacji wydajności obliczeń, która wykorzystuje jednostki wektorowe dostępne w nowoczesnych procesorach.
- **wątek** - część programu wykonywana współbieżnie w obrębie jednego procesu - w jednym procesie może istnieć wiele wątków. Główna różnica między procesem a wątkiem polega na tym, że wszystkie wątki należące do tego samego procesu współdzielą przestrzeń adresową oraz inne zasoby systemowe, takie jak listy otwartych plików czy gniazda sieciowe. Natomiast każdy proces dysponuje własnym, odrębnym zestawem zasobów.
- **własność** (ang. *ownership*) - system zarządzania pamięcią, który eliminuje konieczność używania automatycznego odśmiecania, jednocześnie zapobiegając błędom takim jak użycie po zwolnieniu czy podwójne zwolnienie.

- **wyścigi danych** (ang. *race conditions*) - to sytuacja, w której dwa lub więcej wątków lub procesów próbuje modyfikować wspólną zmienną w tym samym czasie, co prowadzi do nieprzewidywalnych wyników.

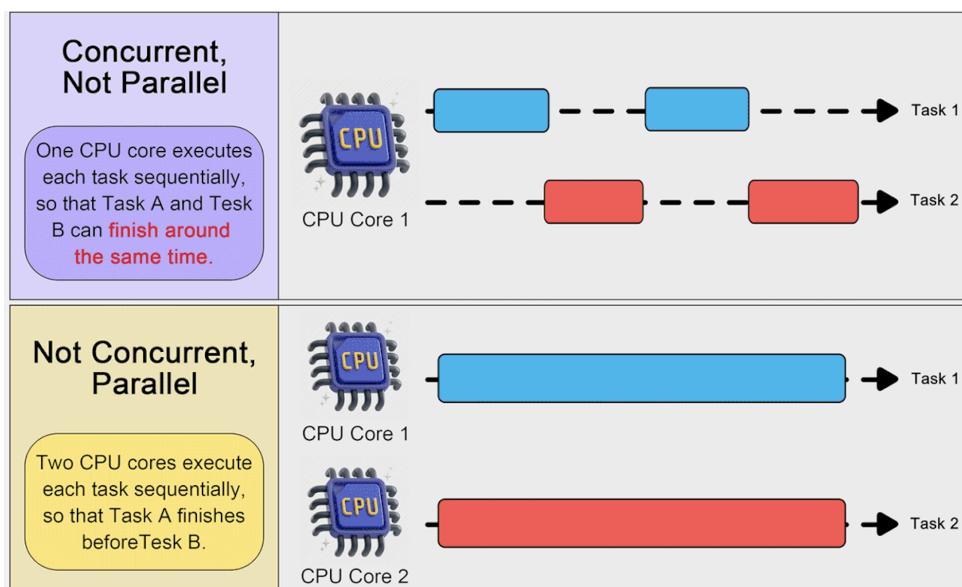
Rozdział 2

Wprowadzenie

Rozdział ten został poświęcony przybliżeniu czytelnikowi zasad działania programowania współbieżnego oraz równoległego, a także omówieniu tych mechanizmów w kontekście języków Rust i C++.

Współczesne systemy komputerowe stają się coraz bardziej złożone, a jednocześnie coraz bardziej wydajne dzięki rozwojowi technologii wielordzeniowych i wieloprocesorowych. W tej sytuacji programowanie współbieżne i równoległe zyskało kluczowe znaczenie, umożliwiając pełne wykorzystanie możliwości sprzętowych. Umiejętność projektowania oraz wdrażania aplikacji, które skutecznie zarządzają równoczesnym wykonywaniem wielu zadań, stała się niezbędna dla programistów tworzących oprogramowanie wymagające wysokiej wydajności oraz możliwości dalszego rozwoju [22, 62, 25, 61]. W niniejszej pracy autor postanowił zbadać podejścia do programowania równoległego jak i współbieżnego zarówno w kontekście języka Rust, jak i C++. Rust jest relatywnie młodym językiem, zaprojektowanym z myślą o bezpieczeństwie pamięci i unikaniu typowych błędów wielowątkowych. Z kolei C++ to język o ugruntowanej pozycji, znany z elastyczności i wysokiej wydajności, co czyni go popularnym wyborem dla aplikacji wymagających precyzyjnego zarządzania zasobami.

Programowanie współbieżne (ang. concurrent programming) oraz programowanie równoległe (ang. parallel programming) to dwa różne, lecz uzupełniające się podejścia, które umożliwiają organizację pracy wielu zadań w aplikacji - poglądowa różnica została zamieszczona na rysunku 2.1. Chociaż często używa się ich zamiennie, ich cechy i cele różnią się znacznie.



Rys. 2.1: Różnice między wykonywaniem zadań współbieżnie a równolegle [24]

2.1. Programowanie współbieżne

Programowanie współbieżne to podejście w projektowaniu aplikacji, które umożliwia równoczesne wykonywanie wielu zadań, choć faktycznie procesor wykonuje tylko jedno zadanie w danej chwili. Dzięki technice tzw. "quasi-równoległości" [50] użytkownik ma wrażenie, że zadania te są realizowane jednocześnie, ponieważ procesor przełącza się między nimi w bardzo krótkich odstępach czasu. Takie podejście jest kluczowe w aplikacjach interaktywnych, takich jak gry komputerowe, aplikacje mobilne czy serwisy internetowe, które muszą błyskawicznie reagować na różne zdarzenia (np. żądania użytkowników, kliknięcia czy komunikaty sieciowe) bez zauważalnych opóźnień [32].

Programowanie współbieżne pozwala na lepsze zarządzanie zadaniami w aplikacjach, które muszą obsługiwać wiele operacji jednocześnie, choć nie zawsze są to zadania wymagające intensywnych obliczeń. Przykładami takich aplikacji mogą być systemy obsługi żądań użytkowników na serwerach, aplikacje multimedialne czy interfejsy graficzne [22].

2.1.1. Mechanizmy realizujące współbieżność

Współbieżność różni się od programowania równoległego tym, że nie wymaga fizycznej wielordzeniowości procesora. Nawet na jednordzeniowym procesorze możliwe jest uzyskanie współbieżności, ponieważ procesor może w bardzo szybki sposób przełączać się między różnymi zadaniami. Tego rodzaju przełączanie nazywane jest "wirtualnym przełączaniem" i odbywa się na poziomie systemu operacyjnego, który odpowiedzialny jest za przeprowadzanie tego procesu w sposób niewidoczny dla użytkownika. Dzięki tej technice użytkownik nie zauważa, że procesor w danym momencie wykonuje tylko jedno zadanie, mimo że wiele z nich jest obsługiwanych "po kolei" w bardzo krótkich cyklach [62, 23].

Kolejnym istotnym mechanizmem, który wspiera współbieżność, jest program szeregujący bądź też planista (ang. scheduler). Jest odpowiedzialny za zarządzanie dostępem do procesora i przydzielanie zasobów obliczeniowych poszczególnym zadaniom. Dzięki zaawansowanym algorytmom harmonogramowania, system operacyjny decyduje, które zadanie ma być wykonane w danym czasie, jak długo ma trwać jego wykonanie, oraz kiedy procesor ma przełączyć się na inne zadanie. Planista zadań może być dostosowywany w zależności od wymagań aplikacji, co pozwala na osiągnięcie optymalnej wydajności i minimalizację opóźnień [62].

2.1.2. Zastosowania programowania współbieżnego

Programowanie współbieżne jest niezwykle ważne w aplikacjach, które muszą reagować na różne wydarzenia użytkownika lub zewnętrzne zdarzenia w czasie rzeczywistym. Typowe zastosowania programowania współbieżnego obejmują [56, 62]:

- Aplikacje interaktywne - gry komputerowe, aplikacje mobilne, aplikacje desktopowe, które muszą natychmiast reagować na akcje użytkownika, jak kliknięcia, gesty czy komendy wprowadzane z klawiatury.
- Systemy serwerowe - serwisy internetowe, bazy danych, aplikacje chmurowe, które muszą jednocześnie obsługiwać wielu użytkowników, wykonując różne operacje, takie jak przetwarzanie zapytań, zapisywanie danych, czy obsługę sesji użytkowników.
- Przetwarzanie zdarzeń w czasie rzeczywistym - systemy monitoringu, systemy alarmowe, aplikacje do analizy danych strumieniowych, które muszą przetwarzać i reagować na dane napływające w czasie rzeczywistym.
- Multimedia - odtwarzanie wideo, transmisje strumieniowe, edycja audio i wideo, gdzie aplikacje muszą równocześnie obsługiwać wiele wątków.

2.1.3. Zalety programowania współbieżnego

Główne zalety stosowania programowania współbieżnego w aplikacjach to [11, 62]:

- Zwiększenie responsywności - dzięki szybkiemu przełączaniu między zadaniami aplikacje stają się bardziej responsywne i wydajne, co jest szczególnie ważne w przypadku interfejsów użytkownika oraz aplikacji reagujących na dynamicznie zmieniające się dane.
- Lepsze wykorzystanie zasobów procesora - współbieżność pozwala na efektywne wykorzystanie mocy obliczeniowej procesora, nawet w przypadku procesorów jednordzeniowych. Przełączanie między zadaniami pozwala na ich efektywne wykonywanie w krótkich cyklach czasowych.
- Skalowalność - aplikacje wykorzystujące współbieżność mogą być łatwiej skalowane na wiele rdzeni procesora lub urządzeń, dzięki czemu mogą obsługiwać większą liczbę użytkowników lub większe ilości danych.

2.1.4. Wady programowania współbieżnego

Pomimo wielu korzyści, programowanie współbieżne wiąże się również z pewnymi wyzwaniami [11, 57]:

- Złożoność synchronizacji - w przypadku współdzielenia zasobów, takich jak pamięć, konieczne jest odpowiednie zarządzanie dostępem do nich. Błędy synchronizacji mogą prowadzić do problemów takich jak wyścigi danych (ang. race conditions) lub zakleszczenia (ang. deadlocks), które mogą uniemożliwić poprawne działanie aplikacji.
- Problemy związane z wydajnością - chociaż współbieżność pozwala na szybsze przetwarzanie wielu zadań, jej realizacja może prowadzić do narutów związanych z przełączaniem kontekstu i synchronizacją. W aplikacjach o dużym stopniu współzależności zadań, narut ten może negatywnie wpływać na wydajność.
- Trudności w debugowaniu - aplikacje współbieżne są trudniejsze do debugowania, ponieważ błędy mogą występować sporadycznie i w zależności od kolejności przełączania wątków, co utrudnia ich wykrywanie i naprawę.

2.2. Programowanie równoległe

Programowanie równoległe to technika, która umożliwia równoczesne wykonywanie wielu zadań, wykorzystując wiele jednostek obliczeniowych. W tym podejściu zadania są fizycznie realizowane jednocześnie na różnych rdzeniach procesora lub innych jednostkach przetwarzających. Programowanie równoległe jest szczególnie użyteczne w aplikacjach wymagających znacznej mocy obliczeniowej, takich jak obliczenia w dziedzinie uczenia maszynowego, symulacje naukowe, przetwarzanie dużych zbiorów danych, rendering grafiki oraz aplikacje o wysokiej wydajności. Dzięki tej technice możliwe jest zredukowanie czasu wykonywania obliczeń, które w tradycyjnym, sekwencyjnym modelu zajmowałyby znacznie więcej czasu [32, 14].

2.2.1. Zasady programowania równoległego

Programowanie równoległe opiera się na podziale złożonych zadań na mniejsze części, które mogą być realizowane jednocześnie. Aby osiągnąć równoległość, aplikacje muszą być zaprojektowane w sposób umożliwiający rozdzielenie obliczeń pomiędzy liczne rdzenie procesora lub urządzenia obliczeniowe, takie jak karty graficzne (GPU). Każda część zadania, tak zwany wątek, może wykonywać obliczenia na niezależnych danych, a na końcu wyniki są zbierane i łączone, aby uzyskać końcowy rezultat [14].

Modele pamięci

W kontekście programowania równoległego, istnieje szereg modeli pamięci, które definiują metody przechowywania oraz dostępu do danych przez jednostki przetwarzające [14]:

- Pamięć współdzielona (ang. Shared Memory Model) - wszystkie jednostki obliczeniowe dzielą wspólną pamięć, co umożliwia łatwą wymianę danych, ale wymaga odpowiedniej synchronizacji.
- Pamięć rozproszona (ang. Distributed Memory Model) - każda jednostka obliczeniowa ma swoją własną pamięć, a komunikacja między jednostkami odbywa się za pomocą przesyłania wiadomości (np. przy użyciu protokołu MPI - Message Passing Interface).
- Model hybrydowy - łączy elementy obu powyższych modeli, gdzie pamięć współdzieloną wykorzystują jednostki w ramach jednego węzła, a komunikacja między węzłami odbywa się przez przesyłanie wiadomości.

Taksonomia Flynn'a

Zrównoleglenia

2.2.2. Zastosowanie programowania równoległego

Programowanie równoległe znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach, w których wymagana jest ogromna moc obliczeniowa oraz szybkie przetwarzanie dużych zbiorów danych. Jednymi z kilku najczęściej wykorzystywanych zastosowań są [49]:

- Uczenie maszynowe i sztuczna inteligencja (ang. AI) - w szczególności w kontekście głębo-kiego uczenia (ang. deep learning), gdzie trening modeli na dużych zbiorach danych wymaga wykonywania tysięcy operacji matematycznych jednocześnie. Dzięki równoległości można przyspieszyć proces uczenia, wykorzystując jednostki GPU, które są zoptymalizowane do obliczeń równoległych.
- Symulacje naukowe - w dziedzinach takich jak fizyka, chemia, biologia, gdzie tworzenie symulacji wymagających obliczeń na dużą skalę (np. symulacje molekularne, modelowanie zjawisk atmosferycznych, dynamika płynów) są realizowane na dużych klastrach komputerowych.
- Przetwarzanie dużych zbiorów danych (ang. Big Data) - analiza danych w czasie rzeczywistym lub w partiiach, które pozwalają na rozdzielenie zadań przetwarzania danych na wiele maszyn.
- Rendering grafiki 3D - w grach komputerowych, filmach animowanych i inżynierii wizualnej, gdzie renderowanie obrazów i animacji wymaga intensywnych obliczeń graficznych. Programowanie równoległe umożliwia szybkie generowanie wysokiej jakości obrazów przez równoczesne przetwarzanie wielu elementów obrazu.

2.2.3. Zalety programowania równoległego

Poprzez wykorzystanie programowania równoległego można się spodziewać następujących korzyści [49]:

- Zwiększenie wydajności - dzięki równoczesnemu przetwarzaniu wielu zadań, czas realizacji obliczeń jest znacznie skrócony.
- Lepsze wykorzystanie zasobów obliczeniowych - współczesne procesory, w tym wielordzeniowe CPU i GPU, oferują dużą moc obliczeniową, którą można efektywnie wykorzystać przy pomocy technik równoległych.
- Skalowalność - aplikacje równoległe mogą być skalowane w zależności od dostępnych zasobów obliczeniowych, umożliwiając zwiększenie wydajności przy rozwoju systemu.

2.2.4. Wady programowania równoległego

Każde rozwiązania niesie ze sobą zalety jak i wady czy też wyzwania implementacyjne, które się z nim wiążą. Programowanie równoległe wiąże się z kilkoma wyzwaniami, które wymagają szczególnej uwagi projektanta systemów [49, 14]:

- Złożoność projektowania - projektowanie systemów równoległych jest bardziej skomplikowane niż projektowanie aplikacji sekwencyjnych. Należy odpowiednio podzielić zadania na mniejsze jednostki, które można wykonać jednocześnie, oraz zadbać o ich synchronizację.
- Synchronizacja danych - w przypadku używania pamięci współdzielonej, należy odpowiednio synchronizować dostęp do danych, aby uniknąć błędów takich jak wyścigi danych (race conditions), które mogą prowadzić do nieprzewidywalnych wyników.
- Problemy komunikacyjne - w systemach rozproszonych, komunikacja między jednostkami przetwarzającymi może stać się wąskim gardłem, obniżającym wydajność systemu. W takich przypadkach konieczne jest optymalizowanie przepływu danych i unikanie zbędnych operacji komunikacyjnych.
- Narzut związany z równoległością - chociaż programowanie równoległe przyspiesza obliczenia, wprowadza również dodatkowy narzut związany z przełączaniem kontekstu między zadaniami, synchronizacją wątków i komunikacją. W przypadku niewielkich zadań, zysk z równoległości może nie przewyższać kosztów narzutu.

Technologie i narzędzia do programowania równoległego Do realizacji obliczeń równoległych dostępnych jest wiele narzędzi i bibliotek wspierających programistów w implementacji równoległych aplikacji. Do najpopularniejszych należą:

- OpenMP (Open Multi-Processing) - biblioteka dla języków C, C++ i Fortran, która umożliwia programowanie równoległe w modelu pamięci współdzielonej. [61, 25]
- CUDA - platforma stworzona przez firmę NVIDIA, przeznaczona do programowania na procesorach graficznych (GPU), wykorzystywana głównie w zastosowaniach związanych z uczeniem maszynowym i obróbką grafiki [14].
- MPI (Message Passing Interface) - standard komunikacji w systemach z pamięcią rozproszoną

Rozdział 3

Przegląd literatury

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie dotychczasowych badań i publikacji dotyczących mechanizmów programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++. Analiza literatury umożliwia zrozumienie aktualnego stanu wiedzy w tej dziedzinie, a także wskazanie na występujące luki badawcze, które niniejsza praca postara się wypełnić. Na samym wstępnie zostały postawione następujące pytania do przeglądu literatury, które pomogą zrozumieć oraz sprawdzić aktualny stan wiedzy jeżeli chodzi o porównanie języków Rust oraz C++:

PPL1: *Jakie główne koncepcje/teorie dominują w literaturze dotyczącej porównania języków Rust oraz C++?*

PPL2: *Jakie metody badawcze są najczęściej stosowane do analizy różnic pomiędzy językami?*

PPL3: *Jak wygląda porównanie dostępności i dojrzałości bibliotek do programowania współbieżnego i równoległego w obu językach?*

PPL4: *Czy istnieją systematyczne metodologie porównywania języków programowania w kontekście współbieżności, które można zastosować do analizy Rust i C++?*

PPL5: *Jakie aspekty programowania współbieżnego i równoległego w Rust i C++ nie zostały dostatecznie zbadane w literaturze?*

PPL6: *Jaki jest stan wiedzy na temat wykorzystania programowania współbieżnego w ramach GPU w językach Rust i C++?*

Odpowiedzi na powyższe pytania pozwolą na zidentyfikowanie kluczowych obszarów, które wymagają dalszych badań oraz na wskazanie na potencjalne kierunki rozwoju w dziedzinie programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++.

3.0.1. Metodologia przeglądu literatury

Proces przeglądu literatury został zrealizowany zgodnie z zasadami przeglądu systematycznego, co oznaczało zastosowanie jasno określonych kryteriów selekcji i wyłączenia. Główne źródła literaturowe obejmowały artykuły naukowe, materiały konferencyjne oraz dokumentację techniczną. Wyszukiwanie przeprowadzono w renomowanych bazach danych naukowych oraz repozytoriach zawierających publikacje z zakresu inżynierii oprogramowania i języków programowania. Dodatkowo zostały również uwzględnione źródła internetowe oraz dokumentacje techniczne.

Przegląd literatury odbywał się z wykorzystaniem narzędzi baz danych oferujących wyszukiwanie, filtrowanie oraz przegląd prac: Scopus, Google Scholar.

3.0.2. Kryteria selekcji oraz wyłączenia

W procesie selekcji literatury uwzględniano przede wszystkim publikacje wydane po 2012 roku, co wynika z faktu, iż w tym właśnie roku zadebiutował język Rust [10]. Wyjątek stanowiły prace o charakterze ogólnym lub takie, które nie odnosiły się bezpośrednio do języka Rust, lecz zawierały istotne informacje dla problematyki badawczej niniejszej pracy.

Analiza obejmowała literaturę w języku polskim oraz angielskim, przy czym zdecydowana większość źródeł stanowiły publikacje anglojęzyczne. Selekcja materiałów opierała się na zgodności tematycznej z zakresem badań. W przypadku wątpliwości co do adekwatności danej pozycji, decyzja o jej włączeniu do przeglądu podejmowana była na podstawie analizy streszczenia. Jeśli po tej analizie publikacja wydawała się istotna, przechodzono do pełnej oceny jej treści.

Publikacje, które po dogłębnej analizie okazywały się nieodpowiednie dla głównego problemu badawczego, nie były uwzględniane w zasadniczej części pracy. Niemniej jednak, jeśli przyczyniły się do lepszego zrozumienia badanego zagadnienia lub pomogły w odpowiedzi na pytania do przeglądu literatury 3, były one odnotowywane jako materiały pomocnicze. Prace nie spełniające powyższych kryteriów lub te, które nie są dostępne za pośrednictwem dostępnych metod (bądź też braku odpowiedzi twórców o prośbę udostępnienia pracy) były wykluczane z dalszej analizy.

3.0.3. Baza Scopus

W ramach bazy Scopus wykorzystano następujące kwerendy do wyszukiwania - tabela 3.3

Tab. 3.1: Kwerendy użyte w bazie Scopus¹

Lp.	Kwerenda	Liczba wyników
1	ALL ("concurrent programming" OR "parallel programming") AND (ALL ("Rust") AND ALL ("C++"))	444
2	ALL ("concurrent programming" OR "parallel programming") AND (ALL ("Rust") AND ALL ("C++")) AND (ALL ("compare"))	28
3	(TITLE-ABS-KEY(("concurrent programming" OR "parallel programming") AND ("Rust" AND "C++"))) AND (TITLE-ABS-KEY("comparison" OR "evaluation" OR "benchmark"))	6
4	(TITLE-ABS-KEY(("thread" OR "async" OR "future" OR "actor model" OR "message passing" OR "shared memory") AND ("Rust" AND "C++"))) AND (TITLE-ABS-KEY("comparison" OR "performance" OR "evaluation"))	50
5	(TITLE-ABS-KEY(("Rust" AND "C++") AND ("concurrency model" OR "parallel constructs" OR "multithreading"))) AND (TITLE-ABS-KEY("comparison" OR "study"))	2

W celu identyfikacji literatury związanej z porównaniem wybranych mechanizmów programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++, opracowano pięć zapytań w bazie Scopus, z których każde miało określony cel badawczy. Pierwsze zapytanie miało na celu uzyskanie ogólnego przeglądu literatury, wyszukując wszystkie dokumenty, w których występują jednocześnie zagadnienia programowania współbieżnego lub równoległego oraz języki Rust i C++, niezależnie od kontekstu. Pozwoliło to oszacować ogólną skalę badań łączących

¹Liczba wyników dla poszczególnych zapytań może się różnić w zależności od daty (wyszukiwanie przeprowadzono w okresie listopad-luty 2024/25).

te zagadnienia. Drugie zapytanie zawęzało zakres wyszukiwania poprzez dodanie słowa kluczowego „compare”, co umożliwiło wyodrębnienie publikacji, w których dokonano bezpośredniego porównania języków Rust i C++ w kontekście współbieżności lub równoległości. Dzięki temu uzyskano bardziej ukierunkowany zbiór literatury odnoszącej się do analizy porównawczej. Trzecie zapytanie charakteryzowało się większą precyzją, ograniczając wyniki do tytułów, streszczeń oraz słów kluczowych, i uwzględniało wyłącznie publikacje zawierające odniesienia do ewaluacji, porównań bądź benchmarków języków Rust i C++. Takie podejście pozwoliło wyselekcjonować najbardziej tematycznie powiązane prace. Czwarte zapytanie miało charakter bardziej techniczny, koncentrując się na konkretnych mechanizmach współbieżności, takich jak wątki, asynchroniczność, obiekty typu futury, model aktorów, przesyłanie komunikatów czy pamięć współdzielona, w połączeniu z terminami dotyczącymi wydajności i oceny. Umożliwiło to dotarcie do badań analizujących niskopoziomowe aspekty działania tych mechanizmów w obu językach. Piąte zapytanie skupiało się na poziomie koncepcyjnym, wyszukując publikacje zawierające takie terminy jak model współbieżności, konstrukty równoległe czy wielowątkowość, wraz z frazami dotyczącymi porównań lub analiz. Celem było zidentyfikowanie prac badających różnice w podejściu do współbieżności na poziomie architektury języka i jego konstrukcji wewnętrznych.

Autor zdecydował się również użyć nowego, wbudowanego narzędzia w systemie Scopus - Scopus AI. Narzędzie to oparte na sztucznej inteligencji, wspomaga eksplorację akademicką w oparciu o dane z platformy Scopus. Dzięki integracji z narzędziem Copilot optymalizuje wyszukiwanie, łącząc metody semantyczne i dopasowanie słów kluczowych. Choć Scopus AI ułatwia badania, jego wyniki warto weryfikować, ponieważ mogą zawierać nieścisłości lub stronniczość. Po wprowadzeniu tytułu pracy w języku angielskim jako kwerendę, Scopus AI zwrócił 9 wyników, biorąc pod uwagę kwerendę stworzoną na podstawie tytułu pracy, zamieszczoną w listingu 3.1. Zwrócone prace pokrywają się z przeglądem umieszczonym w tabeli 3.3

Listing 3.1: Kwerenda wygenerowana przez AI

```
("concurrent programming" OR "parallel programming" OR "
    ↪ multithreading" OR "asynchronous")
AND ("Rust" OR "C++" OR "programming languages" OR "software
    ↪ development")
AND ("performance" OR "efficiency" OR "scalability" OR "resource
    ↪ management")
AND ("synchronization" OR "thread safety" OR "deadlock" OR "race
    ↪ condition")
AND ("libraries" OR "frameworks" OR "tools" OR "APIs")
```

Na podstawie zapytań wykonanych w bazie Scopus zidentyfikowano publikacje odpowiadające tematyce współbieżności i równoległości w językach Rust i C++ (prace w ramach poszczególny zapytaniach się powtarzały). Jednak z uwagi na ograniczenia czasowe oraz objętość wyników, szczegółowej analizie poddano jedynie pierwsze 15 stron wyników, jeżeli było ich więcej, co odpowiada około 150 pracom.

Proces selekcji, obejmujący kolejne etapy oceny tematycznej, lektury streszczeń i wybranych pełnych tekstów zamieszczono w tabeli 3.2.

Tab. 3.2: Przebieg selekcji literatury (baza Scopus)

Etap	Opis	Liczba prac
1	Prace wyjściowe (przejrzane - pierwsze 15 stron wyników)	247
2	Wstępna selekcja tematyczna - usunięcie prac niezwiązanych bezpośrednio z tematem badania	97
3	Lektura streszczeń - eliminacja pozycji bez wartości empirycznej lub porównawczej	39
4	Analiza pełnych treści - wybór prac zawierających konkretne porównania, benchmarki lub studia przypadków	12
5	Prace kluczowe dla problemu badawczego - porównania/omówienie mechanizmów w Rust i C++	9

3.0.4. Baza Google Scholar

Tab. 3.3: Kwerendy użyte w bazie Scopus ²

Lp.	Kwerenda	Liczba wyników
1	Comparison of selected concurrent and parallel programming mechanisms in Rust and C++	321

Podobnie jak w przypadku bazy Scopus, ze względu na dużą ilość wyników zostało wzięte pod uwagę pierwsze 10 stron bazy (100 wyników). Proces selekcji, obejmujący kolejne etapy oceny tematycznej, lektury streszczeń i wybranych pełnych tekstów, przebiegał według poniższego schematu zamieszczono w tabeli 3.4

Tab. 3.4: Przebieg selekcji literatury (baza Google Scholar)

Etap	Opis	Liczba prac
1	Prace wyjściowe (przejrzane - pierwsze 10 stron wyników)	100
2	Wstępna selekcja tematyczna - usunięcie prac niezwiązanych bezpośrednio z tematem badania	37
3	Lektura streszczeń - eliminacja pozycji bez wartości empirycznej lub porównawczej	9
4	Analiza pełnych treści - wybór prac zawierających konkretne porównania, benchmarki lub studia przypadków	8
5	Prace kluczowe dla problemu badawczego - porównania/omówienie mechanizmów w Rust i C++	4

3.1. Porównanie Rust oraz C++

Porównanie języków programowania Rust i C++ jest przedmiotem licznych publikacji, które analizują ich różnorodne aspekty, takie jak struktura kodu, sposób komplikacji, bezpieczeństwo, wydajność oraz obsługa współbieżności i równoległości. Choć istnieje szeroka literatura porównawcza, wciąż stosunkowo niewielkie prace skupiają się w sposób bezpośredni i systematyczny na porównaniu mechanizmów współbieżnego i równoległego przetwarzania w tych dwóch językach. W ostatnich latach pojawiły się jednak wartościowe opracowania, również te akademickie,

²Liczba wyników dla poszczególnych zapytań może się różnić w zależności od daty (wyszukiwanie przeprowadzono w okresie marzec-kwiecień 2025).

które podejmują to zagadnienie. Pomimo tego, że liczba takich prac nadal jest ograniczona, ich jakość i rosnące zainteresowanie środowiska akademickiego wskazują na istotny potencjał badawczy w obszarze porównań paradygmatów współbieżnych w nowoczesnych językach systemowych. Dostępne opracowania stanowią wartościowe punkty odniesienia i uzasadniają potrzebę kontynuacji prac empirycznych w tym zakresie, co znajduje swoje odzwierciedlenie także w niniejszej pracy.

W literaturze można znaleźć prace, które analizują różnice między Rustem a C++ w kontekście bezpieczeństwa, wydajności, zarządzania pamięcią oraz obsługi błędów.

3.1.1. Bezpieczeństwo

Bezpieczeństwo języków Rust i C++ jest jednym z najczęściej analizowanych tematów w literaturze. W przypadku Rusta duży nacisk kładziony jest na eliminację całych klas błędów, takich jak null pointer dereferencing, data races oraz wycieki pamięci. Mechanizmy takie jak ownership, borrow checker oraz obowiązkowa mutowalność zmiennych (explicit mutability) są wymieniane jako kluczowe elementy zapewniające bezpieczeństwo oraz minimalizując ryzyko wycieków pamięci [40].

Z drugiej strony, C++ umożliwia większą kontrolę nad pamięcią, co może być zaletą w systemach wymagających maksymalnej wydajności, ale jednocześnie wiąże się z koniecznością samodzielnego zarządzania zasobami przez programistów. W literaturze [33, 30] często podkreśla się, że to właśnie większa złożoność i ryzyko błędów w kodzie C++ skłoniły społeczność do stworzenia języków takich jak Rust.

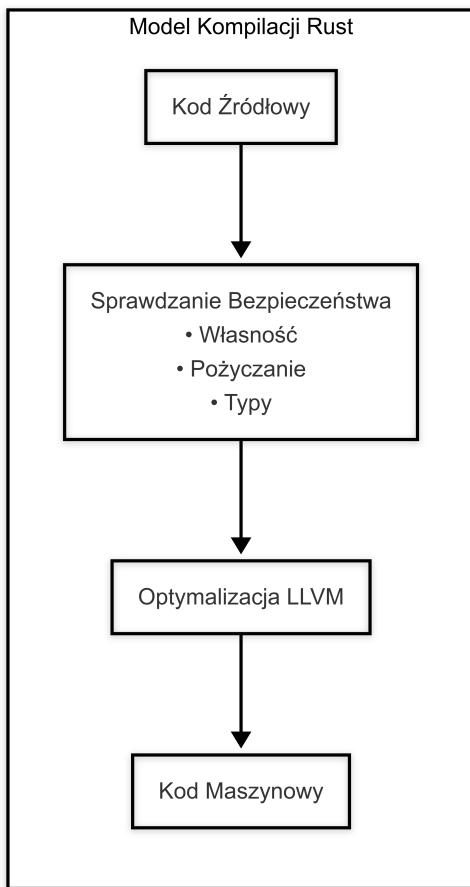
Przykładowo, badania [31, 51, 36] wskazują, że aplikacje napisane w Rust są mniej podatne na błędy związane z wyścigami danych (ang. *data races*), co ma szczególne znaczenie w środowiskach wielowątkowych. Z kolei w C++ stosowanie bibliotek takich jak std::thread czy frameworków typu OpenMP pozwala na osiągnięcie podobnych celów, choć wymaga od programistów większej uwagi w zakresie synchronizacji. Dodatkowo są również prace [63, 55], które przedstawiają próby implementacji mechanizmów wbudowanych w język Rust (prawo własności, pożyczka) do języka C.

3.1.2. Czas wykonania

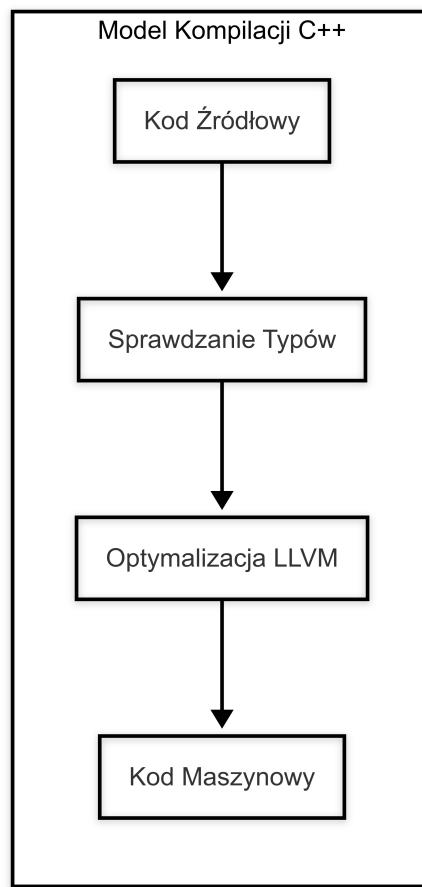
Porównania czasów wykonania programów napisanych w Rust i C++ są częstym tematem analiz [60, 39, 27, 42]. W badaniach tych zostało wykazane, że pod względem wydajności Rust jest konkurencyjny wobec C++, co wynika z mechanizmów komplikacji i optymalizacji kodu.

Jednak kluczową różnicą jest to, że Rust wprowadza pewne narzuty związane z kontrolą bezpieczeństwa w czasie komplikacji, które mogą wydłużyć czas budowania programu, ale nie wpływają znacząco na czas wykonania.

Rust i C++ są językami komplikowanymi, co oznacza, że dedykowany kompilator tłumaczy kod źródłowy na kod maszynowy przed jego wykonaniem. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie wysokiej wydajności programów. W literaturze [41] często podkreśla się, że Rust, w odróżnieniu od C++, kładzie większy nacisk na bezpieczeństwo pamięci oraz typów w czasie komplikacji, co ma kluczowe znaczenie w nowoczesnym oprogramowaniu. W kontekście C++ wskazuje się na jego większą elastyczność oraz bogaty ekosystem, który pozwala na szeroką gamę zastosowań, ale jednocześnie wymaga większej uwagi programistów w zakresie zarządzania pamięcią i synchronizacji wątków.



Rys. 3.1: Kroki kompilacji w języku Rust



Rys. 3.2: Kroki kompilacji w języku C++

Informacje o procesie kompilacji pochodzą z [41, 21, 37], które opisują integrację z LLVM i różnice w sprawdzaniu bezpieczeństwa. Na diagramie 3.1 drugi blok reprezentuje dodatkowe etapy sprawdzania bezpieczeństwa w Rust, które nie występują w C++. Z kolei na diagramie 3.2 drugi blok pokazuje podstawowe sprawdzanie typów w C++, które jest mniej rygorystyczne niż system Rust. Ze względu na różnicę w procesie kompilacji kodu powstają główne różnice w bezpieczeństwie i wydajności obu języków.

C++ nadal pozostaje językiem preferowanym w projektach o krytycznym znaczeniu wydajnościowym, takich jak gry komputerowe, symulacje fizyczne czy systemy wbudowane, choć Rust zaczyna zdobywać popularność w tych obszarach ze względu na większe bezpieczeństwo przy porównywalnej wydajności.

3.1.3. Programowanie współbieżne oraz równoległe

Współbieżność i równoległość to kluczowe elementy programowania w językach Rust i C++. Oba języki oferują zaawansowane narzędzia i biblioteki do zarządzania wielowątkowością.

Rust wyróżnia się systemem własności (ang. *ownership*) i wbudowanym mechanizmem wykrywania błędów współbieżności, co eliminuje wyścigi danych w czasie kompilacji. Narzędzia takie jak Tokio i Rayon pozwalają na łatwe tworzenie i zarządzanie zadaniami asynchronicznymi i równoległymi. C++ z kolei oferuje wsparcie dla wielowątkowości poprzez standardową bibliotekę (`std::thread`) oraz zaawansowane szkielety aplikacyjne (frameworks), takie jak OpenMP czy TBB (Threading Building Blocks). Chociaż te narzędzia są niezwykle potężne, nie zapewniają automatycznej ochrony przed błędami współbieżności, co wymaga większej ostrożności ze strony programistów.

Strona [43] szczegółowo analizuje różnice w podejściu do współbieżności w obu językach, podkreślając, że Rust dzięki swojemu modelowi zarządzania pamięcią oferuje większe bezpieczeństwo, podczas gdy C++ pozostaje bardziej elastyczny, co może być korzystne w bardziej specyficznych scenariuszach. Jednak jak sam autor [43] wskazuje, należy zwrócić uwagę, że większość sztuczek optymalizacyjnych pokazanych w tym porównaniu to jedynie adaptacje oryginalnych rozwiązań C++ w języku Rust. Koncentruje się ona na praktycznym porównaniu języków Rust i C++ pod względem równoległego przetwarzania, szczególnie na poziomie niskopoziomowych operacji i synchronizacji wątków. Znajdują się tam benchmarki pokazujące różnice w czasie wykonywania programów, narzędzia diagnostyczne oraz zestawienie wydajności w kontekście SIMD, wątków, oraz komunikacji międzymiędzy pamięciowej.

W pracy akademickiej Brandefelta i Heymana [34] dokonano porównania wydajności oraz złożoności implementacyjnej aplikacji wielowątkowej napisanej w trzech językach: Rust, C++ oraz Java. Badanie to wykazało, że Rust oferuje zbliżoną wydajność do C++, przy jednoczesnym znacznym uproszczeniu kodu (mniejsza liczba linii kodu), co przekłada się na łatwiejsze utrzymanie i potencjalnie mniejszą podatność na błędy. Autorzy wskazują, że Rust, dzięki swojemu systemowemu własności (ang. *ownership*), eliminuje całe klasy błędów związanych z zarządzaniem pamięcią, bez konieczności stosowania odśmiecania.

Kolejne istotne opracowanie przedstawiono w publikacji Martinsa et al. [45], gdzie zaprezentowano implementację zestawu NAS (NASA Advanced Supercomputing) Parallel Benchmarks (NPB) [8] w języku Rust. Zestaw NPB stanowi uznany w środowisku naukowym standard do oceny wydajności systemów równoległych. W badaniach wykazano, że Rust osiąga porównywalną, a miejscami wyższą wydajność względem C++ i Fortrana (w wersjach OpenMP i sekuracyjnych), co wskazuje na jego rosnący potencjał w dziedzinie wysokowydajnych obliczeń (HPC - High-Performance Computing). Jednocześnie zwróciła uwagę na trudności implementacyjne, związane z restrykcyjnym modelem bezpieczeństwa języka Rust, które jednak mogą być złagodzone poprzez zastosowanie odpowiednich bibliotek (np. Rayon).

Równolegle, w pracy Besozziego [19] zaprezentowano bibliotekę Parallelo Parallel Library (PPL) - autorskie rozwiązanie do strukturalnego programowania równoległego w języku Rust. Biblioteka ta opiera się na wzorach programowania równoległego takich jak skeletons i design patterns, oferując wysokopoziomowe abstrakcje ułatwiające implementację złożonych aplikacji równoległych. Przeprowadzone testy wykazały, że PPL dorównuje lub przewyższa popularne biblioteki takie jak Rayon, jednocześnie zachowując zgodność z idiomami języka Rust i zasadą fearless concurrency. Zastosowanie takich abstrakcji sprzyja zwiększeniu czytelności i poprawności kodu, co może mieć szczególne znaczenie w kontekście projektów systemowych.

Można również znaleźć pracę, która przedstawia wykorzystanie biblioteki odpowiedzialnej za współbieżność FastFlow przez oba języki Rust oraz C++ [52]. Pokazuje ona, że język Rust jest dobrą alternatywą dla języka C++ w kontekście współbieżności.

3.2. Podsumowanie

Na podstawie przeglądu literatury oraz zadanych pytań do przeglądu literatury można wskazać następujące odpowiedzi:

PPL1: Jakie główne koncepcje/teorie dominują w literaturze dotyczącej porównania języków Rust oraz C++?

W literaturze dominują badania porównawcze bezpieczeństwa, wydajności oraz zarządzania pamięcią w językach Rust i C++ - bardziej szczegółowo opisane w podrozdziałach 3.1.1 oraz 3.1.2. W kontekście współbieżności i równoległości można zauważyć znaczący wzrost prac w ubiegłych latach, co przedstawia przegląd opisany w podrozdziale 3.1.3.

PPL2: Jakie metody badawcze są najczęściej stosowane do analizy różnic pomiędzy językami ?

W literaturze oraz w dotychczasowych analizach [16, 17, 2, 7] wskazano szereg kryteriów istotnych przy porównywaniu lub ocenie języków programowania ogólnego przeznaczenia. Do najważniejszych należą:

- Prostota konstrukcji języka, mająca bezpośredni wpływ na łatwość programowania i zrozumiałość kodu
- Czytelność kodu, związana z jego późniejszą konserwacją i rozwijaniem
- Dostosowanie języka do konkretnego zastosowania, co wpływa na wydajność i efektywność programów
- Szybkość komplikacji
- Efektywność działania programu, zarówno pod względem szybkości, jak i zużycia zasobów systemowych,
- Dostępność i jakość bibliotek, frameworków oraz narzędzi wspierających rozwój oprogramowania
- Wsparcie w procesie debugowania, profilowania i testowania kodu
- Bezpieczeństwo języka, związane z eliminacją błędów w czasie komplikacji oraz wykrywaniem zagrożeń w trakcie działania programu
- Długowieczność języka oraz narzędzi komplikacyjnych, co wpływa na stabilność i przewidywalność rozwoju oprogramowania
- Przenośność między różnymi platformami i architekturami sprzętowymi.

Wszystkie te kryteria mają istotny wpływ na całkowity koszt i nakład pracy związany z tworzeniem oraz utrzymaniem oprogramowania, a także na jego jakość i przydatność w długim okresie użytkowania.

Doświadczenie wskazuje również, że te same kryteria można stosować do oceny innych komponentów wspomagających proces tworzenia oprogramowania, takich jak biblioteki klas obiektowych czy projekty typów abstrakcyjnych. Wykorzystanie odpowiednich, zewnętrznych komponentów oraz dobrze zaprojektowanych rozwiązań przyczynia się do poprawy czytelności, utrzymywialności i ogólnej jakości kodu, jednocześnie przyspieszając proces jego tworzenia.

PPL3: Jak wygląda porównanie dostępności i dojrzałości bibliotek do programowania współbieżnego i równoległego w obu językach?

Porównując dostępność i dojrzałość bibliotek do programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++, zauważać można istotne różnice wynikające zarówno z historii rozwoju tych języków, jak i ich podejścia do bezpieczeństwa, abstrakcji oraz zarządzania zasobami.

W przypadku języka C++, biblioteki takie jak OpenMP, Intel TBB czy pthreads cechują się dużą dojrzałością oraz szerokim zastosowaniem w przemyśle, zwłaszcza w kontekście obliczeń naukowych, symulacji fizycznych i systemów o wysokiej wydajności. Są one dobrze udokumentowane, posiadają wsparcie komercyjne (np. TBB) oraz charakteryzują się dużą kompatybilnością z istniejącą infrastrukturą sprzętową i programową. Niemniej jednak, wymagają od programisty głębokiej wiedzy w zakresie zarządzania pamięcią oraz synchronizacji, co przekłada się na wyższy próg wejścia i podatność na błędy (np. wyścigi danych czy zakleszczenia).

Z kolei Rust, jako język nowszy, oferuje bardziej nowoczesny zestaw narzędzi do programowania równoległego, w tym biblioteki takie jak Tokio, Rayon czy Crossbeam. Mimo mniejszej liczby lat rozwoju, biblioteki te szybko dojrzewają i zdobywają popularność dzięki silnym gwarancjom bezpieczeństwa pamięci na poziomie kompilatora oraz ergonomicznemu API. Rust promuje bezpieczne podejście do współbieżności poprzez system własności (ang. *ownership*) i brak domyślnego współdzielenia zasobów, co w praktyce eliminuje całą klasę błędów typowych

dla C++. Dzięki temu biblioteki w Rust, choć mniej rozpowszechnione w starszych zastosowaniach, zyskują przewagę w projektach tworzonych od podstaw, zwłaszcza w środowiskach wymagających wysokiej niezawodności.

PPL4: Czy istnieją systematyczne metodologie porównywania języków programowania w kontekście problemu pracy, które można zastosować do analizy Rust i C++?

W literaturze przedmiotu można znaleźć prace proponujące sformalizowane, systematyczne metodologie służące do porównywania języków programowania w kontekście ich wsparcia dla współprzejności i równoległości. Jednakże zdecydowana większość badań skupia się na aspektach wydajnościowych, bezpieczeństwa pamięci lub ekspresyjności języka, dodatkowo często przyjmują one podejścia ad hoc, oparte na wybranych przypadkach użycia, bez spójnych ram metodologicznych.

Niektóre opracowania, jak np. porównania publikowane w ramach blogów technicznych czy artykułów na platformach takich jak Medium, wykorzystują podejścia oparte na konteneryzacji programów testowych i ich uruchamianiu na jednorodnej infrastrukturze. Przykładowo, w metodzie *Rainbow* [28] badana jest przepustowość obliczeń przy wykorzystaniu kontenerów i zewnętrznego systemu, jak Redis, do monitorowania wyników. Choć takie podejścia są ciekawe, narażone są na zakłócenia wynikające z różnic w czasie inicjalizacji kontenerów, rozmiarze obrazu czy użyciu pamięci, co może zafałszowywać końcowe wyniki porównawcze.

Znacznie bardziej sformalizowanym podejściem jest wykorzystanie ustandaryzowanych pakietów benchmarkowych, takich jak NAS Parallel Benchmarks (NPB), które zostały opracowane przez NASA w celu obiektywnej oceny wydajności systemów wieloprocesorowych. Przykładem zastosowania tej metodologii jest praca „NPB-Rust” [45], w której autorzy przeprowadzili systematyczne porównanie implementacji benchmarków NAS w języku Rust (z użyciem biblioteki Rayon) oraz C++ (z użyciem OpenMP). Ocenie poddano nie tylko wydajność obliczeniową, ale również skalowalność, zużycie pamięci oraz nakład implementacyjny, mierząc m.in. liczbę linii kodu i szacowany koszt harmonogramowania według modelu COCOMO - (ang. *Constructive Cost Model*) - to model szacowania kosztów związanych z rozwojem oprogramowania.

Takie podejścia, oparte na zweryfikowanych zestawach testowych, umożliwiają bardziej wiarygodne i powtarzalne porównania pomiędzy językami programowania w kontekście współprzejności i równoległości. W związku z tym, zastosowanie frameworków benchmarkowych takich jak NPB powinno być traktowane jako wzorzec dla przyszłych badań w tej dziedzinie.

PPL5: Jakie aspekty programowania współbieżnego i równoległego w Rust i C++ nie zostały dostatecznie zbadane w literaturze?

Dotychczasowe badania naukowe dotyczące programowania współbieżnego w językach Rust i C++ koncentrowały się przede wszystkim na ogólnych aspektach, takich jak bezpieczeństwo pamięci, kontrola dostępu do danych, ergonomia kodu oraz wydajność komplikacji i wykonania. W szczególności analizowano podejście języków do eliminacji błędów wykonawczych (np. data races), mechanizmy typowania oraz zarządzanie zasobami systemowymi. Przykładem mogą być prace [34], które zestawiają Rust i C++ w kontekście praktycznych implementacji aplikacji wielowątkowych, czy badania [45], porównujące implementacje benchmarków równoległych.

Niemniej jednak, najnowsze publikacje wskazują na wypełnienie wielu wcześniej istniejących luk, zwłaszcza w zakresie porównania konkretnych konstrukcji językowych (np. async/await, kanały, skeletony) oraz empirycznej weryfikacji wydajności bibliotek wspierających równolełość (np. PPL, Rayon, OpenMP).

Pomimo tego, w literaturze wciąż można zidentyfikować kilka istotnych obszarów badawczych, które pozostają niewystarczająco zbadane:

- **Wpływ architektury sprzętowej na zachowanie systemów współbieżnych:**

Większość dotychczasowych badań prowadzono na klasycznych architekturach x86_64. Brakuje natomiast analiz zachowania aplikacji wielowątkowych w Rust i C++ na alternatywnych platformach, takich jak ARM, RISC-V czy systemy heterogeniczne (np. SoC zawierające zarówno CPU, jak i akceleratory). Tego typu analizy są szczególnie istotne w kontekście rozwoju systemów wbudowanych oraz IoT, gdzie Rust zyskuje coraz większą popularność.

- **Koszt abstrakcji oraz narzut związany z modelem bezpieczeństwa Rust:**

Choć bezpieczeństwo współbieżności w Rust jest jego kluczowym atutem, literatura rzadko podejmuje próbę precyzyjnego oszacowania narzutu wydajnościowego wynikającego z jego rygorystycznego modelu własności i borrow checkera. Istnieje potrzeba eksperymentalnych badań porównawczych, które wykazałyby, w jakim stopniu koszt ten wpływa na skalowalność aplikacji w środowiskach o dużym współczynniku równoległości.

- **Porównanie ergonomii rozwiązań współbieżnych na poziomie idiomatycznym i bibliotekowym:**

Chociaż wiele prac omawia techniczne możliwości języków (np. std::thread, tokio, OpenMP, std::thread w C++), nadal brakuje badań jakościowych dotyczących ergonomii kodu, łatwości debugowania oraz odporności na błędy logiczne podczas implementacji systemów wielowątkowych. Takie analizy mogłyby obejmować porównania idiomatycznych podejść (np. actor model, CSP, fork-join), oferowanych przez biblioteki Rust i C++.

- **Zachowanie systemów współbieżnych w warunkach zmiennego obciążenia i konkurencyjnego dostępu:**

Istnieje luka w badaniach dotyczących stabilności i odporności aplikacji na skoki obciążenia lub dynamiczną alokację wątków. Potrzebne są badania stresowe i profilowanie systemów w warunkach rzeczywistej konkurencji (np. serwery HTTP, silniki obliczeniowe), co pozwoliłoby ocenić adaptacyjność strategii planowania i zarządzania wątkami w Rust i C++.

- **Weryfikacja formalna i modelowanie błędów współbieżności:**

Pomimo iż język Rust oferuje silne gwarancje bezpieczeństwa na etapie komplikacji - statyczna gwarancja bezpieczeństwa, zagadnienia związane z formalną weryfikacją własności współbieżnych, takich jak żywotność (ang. *liveness*), brak zagłodzenia (ang. *starvation-freedom*) czy deterministyczność wykonania, pozostają w literaturze stosunkowo słabo zbadane. Potencjalnie wartościowym kierunkiem dalszych analiz byłoby porównanie dostępnych narzędzi formalnych, takich jak weryfikatory modeli, w kontekście języka Rust oraz innych języków programowania współbieżnego. Tego rodzaju zestawienie mogłoby przyczynić się do lepszego zrozumienia możliwości i ograniczeń istniejących podejść do formalnej weryfikacji w środowiskach wielowątkowych.

PPL6: Jaki jest stan wiedzy na temat wykorzystania programowania współbieżnego w ramach GPU w językach Rust i C++?

W literaturze przedmiotowej oraz w praktyce programistycznej, zagadnienie wykorzystania programowania współbieżnego na GPU ewoluje w różnym tempie w zależności od języka programowania. W przypadku języka Rust obserwujemy dynamiczny rozwój narzędzi, które umożliwiają wykorzystanie mocy obliczeniowej kart graficznych przy jednoczesnym zachowaniu wysokich gwarancji bezpieczeństwa pamięci i wątków.

Projekty takie jak rust-gpu [9] dążą do umożliwienia pisania shaderów w języku Rust, oferując podejście, które integruje możliwości GPU z bezpiecznymi konstrukcjami języka. Dokumentacja dostępna na stronie github [9] wskazuje na intensywne prace nad przeniesieniem wielu korzyści wynikających z systemu własności i typowania Rust na środowisko GPU, co może przyczynić się do zmniejszenia ryzyka błędów współbieżności, które są szczególnie krytyczne w obliczeniach równoległych.

Równolegle, biblioteka Vulkano (dostępna m.in. poprzez dokumentację [12]) stanowi wysokopoziomowy, bezpieczny interfejs do API Vulkan, które jest standardem w programowaniu GPU. Vulkano umożliwia abstrakcję złożoności niskopoziomowych interfejsów, jednocześnie oferując możliwość pełnego wykorzystania równoległości GPU. W podobnym nurcie znajduje się projekt wgpu, który implementuje standard WebGPU, umożliwiając przenośne aplikacje graficzne i obliczeniowe, a jednocześnie integrując współczesne podejścia do zarządzania zasobami i synchronizacji.

W przeciwieństwie do podejścia Rust, w środowisku C++ dominującym rozwiązaniem jest platforma CUDA, rozwijana i wspierana przez firmę NVIDIA [4]. CUDA oferuje bardzo dojrzały, zoptymalizowany i szeroko stosowany framework, który pozwala na bezpośrednią implementację algorytmów równoległych na GPU. W odróżnieniu od narzędzi rozwijanych dla Rust, CUDA posiada ugruntowaną pozycję w środowisku przemysłowym, co przekłada się na bogatą dokumentację, szerokie wsparcie techniczne oraz liczne biblioteki wspomagające rozwój aplikacji wykorzystujących GPU.

Podsumowując, stan wiedzy dotyczący programowania współbieżnego na GPU w języku Rust znajduje się na etapie intensywnego rozwoju i eksperymentacji, gdzie projekty takie jak rust-gpu, Vulkano oraz wgpu [13] pokazują potencjał tego podejścia, zwłaszcza w kontekście bezpieczeństwa i nowoczesnych abstrakcji. Z kolei w C++ platforma CUDA, dzięki swojej dojrzałości oraz szerokiemu wsparciu ze strony przemysłu, pozostaje głównym narzędziem wykorzystywanym do implementacji wysokowydajnych obliczeń równoległych na GPU.

3.2.1. Kierunki dalszych badań

Na podstawie przeglądu literatury oraz odpowiedzi na pytania do przeglądu literatury można wskazać na kilka kierunków dalszych badań w dziedzinie programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust i C++:

- **Rozszerzone porównania systematyczne mechanizmów współbieżnych i równoległych** — z uwzględnieniem nie tylko wydajności, ale także ergonomii, bezpieczeństwa pamięci, ekspresyjności kodu oraz kosztu implementacyjnego.
- **Analiza porównawcza konkretnych mechanizmów i bibliotek** — takich jak `std::thread` w C++ i Rust, OpenMP vs Rayon, czy też mechanizmy asynchroniczne (`async/await` w Rust kontra `futures`, `std::coroutine` w C++20 i nowszych).
- **Analiza wpływu zastosowania unsafe code w Rust** — w kontekście uzyskiwanej wydajności i kompromisów względem bezpieczeństwa pamięci oraz czytelności kodu.
- **Zastosowania programowania równoległego na GPU** — porównanie możliwości Rust (np. poprzez biblioteki takie jak `rust-gpu` czy `wgpu`) z rozwiązaniami dostępnymi w ekosystemie C++ (np. CUDA, SYCL, OpenCL).
- **Badanie wpływu konstrukcji językowych na podatność na błędy współbieżności** — np. warunki wyścigu, zakleszczenia, użycie nieprawidłowych referencji lub wskaźników, z uwzględnieniem poziomu ochrony oferowanego przez kompilator.

Rozdział 4

Wybrane mechanizmy w języku Rust

o czym rozdział

4.1. Podejście do współbieżności i równoległości

Rozwój języka Rust oferuje szereg funkcji, które czynią go dobrym wyborem do programowania współbieżnego oraz równoległego. Kluczowymi elementami, które wyróżniają go na tle innych języków programowania są [21]:

1. Własność (ang. *ownership*) i pożyczanie (ang. *borrow*): Model własności języka Rust zapewnia, że dane są bezpiecznie współdzielone między wątkami bez ryzyka wyścigów danych (ang. *races*).
2. Nieustraszona współbieżność (ang. *Fearless Concurrency*): System typów Rusta wymusza reguły w czasie kompilacji, pozwalając programistom na pisanie współbieżnego kodu bez obawy o typowe pułapki.
3. Inteligentne wskaźniki (ang. *smart pointers*): Abstrakcje wspierające korzystanie oraz przesyłanie danych w programowaniu współbieżnym oraz równoległym.

4.1.1. Ownership oraz borrow

Własność (ang. *ownership*) jest fundamentalnym konceptem w języku Rust, który zapewnia bezpieczeństwo pamięci bez konieczności stosowania mechanizmu odśmiecania (ang. *garbage collection*). Każda wartość posiada jednego właściciela, który jest odpowiedzialny za zwolnienie pamięci zajmowanej przez tę wartość, gdy wychodzi ona z zakresu (ang. *scope*). Model własności zapobiega wyścigom danych i zapewnia efektywne zarządzanie pamięcią.

Kluczowe zasady własności:

- Każda wartość ma jednego właściciela.
- Gdy właściciel wychodzi z zakresu, wartość zostaje usunięta (ang. *roped*).
- Własność może zostać przeniesiona (ang. *moved*) na inną zmienną.

Pożyczanie (ang. *borrowing*) umożliwia tworzenie referencji do wartości bez przejmowania jej własności. Jest to kluczowe dla umożliwienia różnym częściom programu dostępu do danych bez ich duplikowania. Rust pozwala na pożyczanie wartości według dwóch zasad:

- Pożyczanie niemutowalne (domyślne) (ang. *immutable*): Można utworzyć wiele referencji, ale żadna z nich nie może modyfikować wartości.

- Pożyczanie mutowalne (ang. *mutable*): W danym momencie może istnieć tylko jedna mutowalna referencja, co zapobiega wyścigom danych.

Listing 4.1: Przykład mechanizmu borrow

```
fn main() {
    let s1 = String::from("Hello,World");
    let s2 = &s1; // Immutable borrow - pożyczka niemutowalna
    println!("{}", s2); // Ok
    // let s3 = &mut s1; // Error
}
```

W powyższym listingu 4.1 zaprezentowano element dotyczący użycia pożyczki w języku Rust. Błąd, oznaczony jako *Error* wynika z faktu, iż nie jest możliwe pożyczanie obiektu *s1* jako mutowalnego, ponieważ jest on jednocześnie pożyczany jako niemutowalny do obiektu *s2* (domyślnie)

4.1.2. Nieustraszona współbieżność

Mechanizm ten wynika bezpośrednio z rygorystycznych reguł systemu typów i modelu własności, które są integralną częścią tego języka. Dzięki temu Rust pozwala na tworzenie kodu współbieżnego, minimalizując ryzyko wystąpienia typowych błędów, takich jak wyścigi danych czy nieokreślone zachowanie wynikające z użycia wskaźników do już zwolnionej pamięci (ang. *dangling pointers*).

Rust wymusza bezpieczeństwo współbieżności w czasie komplikacji poprzez analizę własności i okresu życia danych (ang. *lifetimes*). Mechanizm ten zapobiega jednoczesnemu mutowальнemu dostępowi do tych samych danych w różnych wątkach (opisane w punkcie 4.1.1), co eliminuje potrzebę ręcznego zarządzania pamięcią czy synchronizacji przez programistę. Takie podejście czyni współbieżność w Rust nie tylko bezpieczną, ale również przewidywalną, co znacząco ułatwia jej implementację [64].

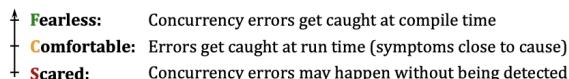


Figure 2: A spectrum of fear in parallel programming.

Rys. 4.1: Spektrum nieustraszonej współbieżności [15]

Autorzy [15] uważają, że nieustraszona współbieżność jest lepiej interpretowana jako spektrum, zilustrowane na 4.1 idealnie eliminując wszelkie obawy przed błędami współbieżności w czasie komplikacji (Fearless), ale jeśli nie jest to możliwe, utrzymując objawy błędów w czasie wykonywania blisko ich przyczyn (Comfortable) lub w inny sposób nie dając gwarancji odtworzenia przyczyny ani objawu (Scared).

Przetłumaczono z DeepL.com (wersja darmowa)

4.1.3. Inteligentne wskaźniki (ang. *Smart Pointers*)

Inteligentne wskaźniki w języku Rust stanowią zaawansowane abstrakcje, które poszerzają funkcjonalność tradycyjnych wskaźników poprzez wbudowane automatyczne zarządzanie pamięcią oraz semantykę własności. Stanowią one kluczowy element gwarantujący bezpieczeństwo pamięci w Rust, umożliwiając pisanie bezpiecznego oraz odpornego na błędy kodu, bez konieczności korzystania z automatycznego systemu zarządzania pamięcią. Ponadto, wskaźniki

te są wykorzystywane zarówno w programowaniu współbieżnym, jak i równoległy, wspierając kontrolowaną oraz bezpieczną wymianę danych. Poniżej omówione zostaną trzy najczęściej używane intelligentne wskaźniki w Rust: Box, Rc oraz Arc.

Box

Własność Danych na Stercie Smart pointer Box służy do alokacji pamięci na stercie, oferując prosty i efektywny sposób zarządzania własnością dużych struktur danych lub typów rekurencyjnych. Przenosząc dane na stertę, Box redukuje wykorzystanie stosu, co czyni go idealnym rozwiązaniem w sytuacjach, gdy rozmiar danych może się zmieniać lub nie jest znany w czasie komilacji.

Wykorzystuje się go do przechowywania dużych struktur danych, obsługi typów rekurencyjnych, których rozmiar nie może być określony w czasie komplikacji.

Listing 4.2: Inteligentny wskaźnik Box

```
fn main() {
    let b = Box::new(5); // Alokacja liczby całkowitej na stercie
    println!("{}", b);   // Dostęp do wartości za pomocą wskaźnika Box
}
```

Rc: Wskaźnik z Liczeniem Referencji

Smart pointer Rc (Reference Counted) umożliwia współdzielenie własności danych przez wiele części programu. Automatycznie śledzi liczbę referencji do danych i usuwa je dopiero wtedy, gdy ostatnia referencja zostanie usunięta. Rc nie jest jednak bezpieczny dla wątków i powinien być używany tylko w przypadkach programów jednowątkowych.

Najczęściej wykorzystywany podczas współdzielenia danych pomiędzy różnymi częściami programu w środowiskach jednowątkowych, implementacji struktur danych, takich jak grafy czy drzewa z węzłami współdzielonymi.

Listing 4.3: Inteligentny wskaźnik RC

```
use std::rc::Rc;

fn main() {
    let a = Rc::new(5);      // Utworzenie licznika referencji
    let b = Rc::clone(&a);  // Klonowanie zwiększa licznik referencji
    println!("{}", b);      // Dostęp do współdzielonych danych
}
```

Arc: Atomowy Wskaźnik z Liczeniem Referencji

Dla programowania współbieżnego Rust oferuje Arc (Atomic Reference Counted), czyli wersję Rc, która jest bezpieczna dla wątków. Wykorzystuje operacje atomowe do bezpiecznego współdzielenia danych pomiędzy wątkami, gwarantując poprawne aktualizacje liczników referencji bez ryzyka wyścigów danych.

Listing 4.4: Inteligentny wskaźnik Arc

```
use std::sync::Arc;
use std::thread;
```

```

fn main() {
    let a = Arc::new(5);           // Utworzenie atomowego licznika
    ↪ referencji
    let a_clone = Arc::clone(&a); // Klonowanie dla bezpiecznego współ
    ↪ dzielenia

    let handle = thread::spawn(move || {
        println!("{} ", a_clone); // Dostęp do współdzielonych danych w
    ↪ nowym wątku
    });

    handle.join().unwrap(); // Oczekивание на закончение wątku
}

```

Niebezpieczny Rust (Unsafe Rust)

Jednym z kluczowych wyróżników języka Rust jest rygorystyczny system bezpieczeństwa pamięci, realizowany poprzez model własności (ang. *ownership*), pożyczania (ang. *borrowing*) oraz statyczną kontrolę mutualności. Niemniej jednak, w niektórych przypadkach - szczególnie przy niskopoziomowych operacjach systemowych, interoperacyjności z językiem C lub zaawansowanej optymalizacji - konieczne staje się tymczasowe zawieszenie niektórych mechanizmów ochronnych. W tym celu Rust oferuje specjalny blok językowy: unsafe.

Deklaracja unsafe nie oznacza, że kod z założenia jest błędny lub niewłaściwy. Oznacza jedynie, że kompilator przestaje gwarantować bezpieczeństwo pamięciowe i odpowiedzialność za poprawność działania spoczywa w pełni na programiście. Z poziomu unsafe można wykonać następujące operacje [18] :

- dereferencję wskaźników surowych (ang. *raw pointers*),
- wywołanie funkcji lub interfejsów oznaczonych jako unsafe (np. z FFI - (ang. *Foreign Function Interface*), czyli interfejs do wywoływanego funkcji z innych języków, np. C),
- dostęp do zmiennych statycznych o niesynchronizowanym dostępie,
- implementację niektórych cech (ang. *traits*) systemowych w sposób potencjalnie niebezpieczny,
- bezpośrednią manipulację pamięcią (alokacja, kopiowanie, itd.).

Poniższy przykład demonstruje dereferencję wskaźnika surowego (*const T, *mut T), która wymaga bloku unsafe:

Listing 4.5: Przykład użycia unsafe Rust

```

fn main() {
    let x: i32 = 42;
    let ptr: *const i32 = &x;

    unsafe {
        println!("Wartość pod wskaźnikiem ptr: {} ", *ptr);
    }
}

```

W powyższym kodzie listing 4.5 wskaźnik ptr jest wskaźnikiem surowym (ang. *raw pointer*), który nie posiada gwarancji poprawności, jakie zapewniają referencje bezpośrednie (&T, &mut

T). Aby móc odczytać wartość spod tego wskaźnika, konieczne jest oznaczenie operacji jako unsafe.

Warto jednak podkreślić, że Rust promuje zasadę minimalnego zaufania (ang. *principle of minimal trust*), dlatego zaleca się ograniczanie użycia unsafe do niezbędnych sekcji oraz hermetyzowanie ich w bezpiecznych abstrakcjach (np. typach własnych, modułach lub API) [18].

4.2. Programowanie współbieżne

Współbieżność to zdolność systemu do obsługi wielu zadań, które potencjalnie mogą się nakładać w czasie. Współbieżność odnosi się do zdolności systemu do jednoczesnego obsługiwania wielu zadań, które mogą mieć miejsce w tym samym czasie. Język Rust został zaprojektowany z uwzględnieniem bezpieczeństwa i wydajności w kontekście współbieżności, co czyni go niezwykle atrakcyjnym narzędziem dla programistów zajmujących się systemami wielowątkowymi.

4.2.1. Model własności pamięci

Centralnym elementem podejścia Rusta do współbieżności jest model własności pamięci, który umożliwia programistom tworzenie kodu współbieżnego bez ryzyka wystąpienia błędów związanych z niebezpiecznym dostępem do współdzielonej pamięci. Mechanizm ten, oparty na koncepcjach własności, pożyczania oraz systemu typów, pozwala kompilatorowi Rust na statyczne wykrywanie potencjalnych problemów, takich jak wyścigi danych (data races). Własność pamięci zapewnia, że tylko jeden wątek może posiadać mutowalny dostęp do danej zmiennej w danym czasie, eliminując tym samym możliwość niespodziewanej ingerencji ze strony innych wątków 4.1.1.

4.2.2. Biblioteki

Tokio

Tokio to biblioteka służąca do obsługi zadań asynchronicznych (ang. asynchronous tasks) oraz wejścia-wyjścia bez blokad (ang. *non-blocking I/O*). Wykorzystuje pętlę zdarzeń (ang. *event loop*), dzięki której możliwe jest współbieżne przetwarzanie wielu zadań bez konieczności tworzenia oddzielnego wątków systemowych dla każdego z nich. Tokio wspiera zarówno jednowątkowy jak i wielowątkowy tryb działania, co pozwala na rozwój aplikacji zgodnie z potrzebami.

Listing 4.6: Przykład użycia Tokio

```
use tokio::net::TcpListener;
use tokio::io::{AsyncReadExt, AsyncWriteExt};

#[tokio::main]
async fn main() {
    let listener = TcpListener::bind("127.0.0.1:8080").await.unwrap();
    loop {
        let (mut socket, _) = listener.accept().await.unwrap();
        tokio::spawn(async move {
            let mut buf = [0; 1024];
            let n = socket.read(&mut buf).await.unwrap();
            socket.write_all(&buf[0..n]).await.unwrap();
        });
    }
}
```

```

    }
}

```

W powyższym przykładzie listing 4.6 tokio::spawn inicjuje współbieżne zadanie, które przetwarza połączenie TCP bez blokowania głównej pętli programu.

Crossbeam::channel - komunikacja między wątkami

Crossbeam to zestaw narzędzi wspierających programowanie współbieżne. Jednym z kluczowych komponentów tej biblioteki są kanały komunikacyjne (ang. *channels*), implementowane w module crossbeam::channel. Stanowią one bezpieczny i efektywny sposób przesyłania wiadomości pomiędzy wątkami, umożliwiając implementację wzorca producent-konsument.

Listing 4.7: Przykład użycia kanałów Crossbeam

```

use crossbeam::channel;
use std::thread;

fn main() {
    let (sender, receiver) = channel::unbounded();

    let producer = thread::spawn(move || {
        for i in 0..5 {
            sender.send(i).unwrap();
        }
    });

    let consumer = thread::spawn(move || {
        while let Ok(msg) = receiver.recv() {
            println!("Odebrano: {}", msg);
        }
    });

    producer.join().unwrap();
    consumer.join().unwrap();
}

```

W tym przypadku listing 4.7 channel::unbounded() tworzy kanał bez ograniczenia pojemności (ang. *unbounded channel*), który może służyć do swobodnej komunikacji między wątkami.

Actix

Actix to framework do tworzenia współbieżnych aplikacji opartych na modelu aktorowym. W tym podejściu jednostką obliczeniową jest aktor, który posiada własny stan i komunikuje się z innymi aktorami wyłącznie za pomocą wiadomości. Takie podejście eliminuje potrzebę stosowania blokad.

Listing 4.8: Przykład użycia Actix

```

use actix::prelude::*;

struct Ping;

```

```

impl Message for Ping {
    type Result = &'static str;
}

struct MyActor;

impl Actor for MyActor {
    type Context = Context<Self>;
}

impl Handler<Ping> for MyActor {
    type Result = &'static str;

    fn handle(&mut self, _: Ping, _: &mut Context<Self>) -> Self::Result {
        "pong"
    }
}

#[actix::main]
async fn main() {
    let addr = MyActor.start();
    let res = addr.send(Ping).await.unwrap();
    println!("{}", res);
}

```

W zaprezentowanym przykładzie aktor MyActor odbiera wiadomości typu Ping i odpowiada komunikatem pong. Każdy aktor działa w swoim własnym kontekście, co zapewnia izolację stanu i zwiększa bezpieczeństwo współbieżne bez użycia mutexów.

4.2.3. Kanały

Kanały (ang. *channels*) to mechanizm w języku Rust, który umożliwia bezpieczną i efektywną komunikację między wątkami. Kanały są jednym z kluczowych elementów modelu współbieżności w tym języku, zapewniając sposób przesyłania danych z jednego wątku do drugiego, jednocześnie minimalizując ryzyko problemów związanych z współdzieleniem pamięci. Kanały są oparte na wzorcu producenta-konsumenta, gdzie jeden wątek (producent) wysyła dane, a inny wątek (konsument) je odbiera.

W Rust kanały są częścią standardowej biblioteki i implementują model komunikacji oparty na kolejkach **FIFO** (*First In, First Out*). W kontekście Rust'a kanały są realizowane przez struktury **Sender** (nadawca) i **Receiver** (odbiorca), które stanowią mechanizm do przesyłania danych między wątkami. Kanały zapewniają synchronizację pomiędzy wątkami, eliminując potrzebę bezpośredniego współdzielenia pamięci w sposób, który mógłby prowadzić do niepożądanych efektów ubocznych, takich jak błędy związane z równoległym dostępem do tej samej przestrzeni pamięci.

Kanały w Rust działają na zasadzie przekazywania wartości z wątku do wątku. Są one bezpieczne, ponieważ Rust zapewnia, że nie wystąpią wyścigi danych — Sender jest odpowiedzialny za wysyłanie danych, a Receiver za ich odbiór. Rust automatycznie zapewnia synchronizację,

więc nie ma potrzeby stosowania dodatkowych mechanizmów, jak blokady mutexów, do zarządzania dostępem do pamięci.

Tworzenie kanałów

Kanał można stworzyć za pomocą funkcji `mpsc::channel()` z modułu `std::sync`. Ta funkcja zwraca dwie wartości: nadawcę (Sender) i odbiorcę (Receiver).

Listing 4.9: Przykład tworzenia kanału

```
use std::sync::mpsc;
use std::thread;

fn main() {
    // Tworzenie kanału
    let (tx, rx) = mpsc::channel();

    // Tworzenie wątku producenta
    thread::spawn(move || {
        let value = String::from("Hello from the producer!");
        tx.send(value).expect("Failed to send message");
    });

    // Odbiór wiadomości w wątku konsumenta
    let received = rx.recv().expect("Failed to receive message");
    println!("Received: {}", received);
}
```

Opis wykonanych kroków w celu utworzenia kanałów w listingu 4.9:

1. Tworzymy kanał za pomocą `mpsc::channel()`, który zwraca parę (tx, rx) — tx jest nadawcą, a rx odbiorcą.
2. Tworzymy nowy wątek (producenta), który wysyła wiadomość ("Hello from the producer!") do kanału.
3. W głównym wątku (konsument) odbieramy wiadomość za pomocą `recv()` i drukujemy ją na ekranie.

Wysyłanie i odbieranie danych

Nadawca (Sender) jest używany do wysyłania danych do kanału. Można wysłać dowolny typ, który jest przesyłany przez kanał. Funkcja `send()` jest używana do wysyłania wartości, a `recv()` w odbiorcy blokuje wątek do momentu otrzymania danych.

Odbiorca (Receiver) odbiera dane z kanału. Jest to blokująca operacja, co oznacza, że wątek odbiorcy będzie czekał, aż dane będą dostępne do odebrania.

Przykład wielokrotnego odbioru

Kanały w Rust są domyślnie jednokierunkowe, co oznacza, że tylko jeden odbiorca może odbierać wiadomości z kanału. Możemy jednak tworzyć wiele kanałów i różne wątki odbiorcze, aby efektywnie rozdzielać zadania.

Listing 4.10: Przykład z wieloma wątkami

```
use std::sync::{mpsc, Arc, Mutex};
```

```

use std::thread;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();
    let rx = Arc::new(Mutex::new(rx));

    // Tworzenie 3 wątków konsumentów
    for i in 0..3 {
        let rx = Arc::clone(&rx); // Klonowanie Arc, nie Receiver
        thread::spawn(move || {
            let message = rx.lock().unwrap().recv().expect("Failed to receive message");
            println!("Consumer {} received: {}", i, message);
        });
    }

    // Wysyłanie wiadomości do konsumentów
    for i in 0..3 {
        let message = format!("Message {}", i);
        tx.send(message).expect("Failed to send message");
    }

    // Zatrzymanie wątku głównego, aby konsument mógł zakończyć pracę
    thread::sleep(std::time::Duration::from_secs(1));
}

```

W tym przykładzie 4.10 tworzymy trzy wątki konsumentów, z których każdy odbiera wiadomości z tego samego kanału. Wątek główny wysyła trzy wiadomości, które są odbierane przez konsumentów.

- Dodatkowo została użyta struktura ***Arc<Mutex<Receiver>>*** 4.1.3 do umożliwienia współdzielenia odbiorcy (Receiver) między wątkami. Mutex zapewnia synchronizację dostępu do kanału, dzięki czemu tylko jeden wątek w danej chwili może odbierać wiadomości.
- ***Arc::clone*** klonuje Arc, a nie Receiver. Arc tworzy nowy uchwyt do tego samego obiektu w pamięci, dzięki czemu wszystkie wątki mogą uzyskać dostęp do tego samego kanału.
- ***lock()*** Każdy wątek przed odebraniem wiadomości blokuje mutex, aby uzyskać dostęp do kanału w bezpieczny sposób.

Przykładowa odpowiedź programu:

```

Consumer 0 received: Message 0
Consumer 2 received: Message 2
Consumer 1 received: Message 1

```

Zakończenie pracy z kanałami

Kanał w Rust jest "ograniczony"— po wysłaniu wszystkich danych nadawca (sender) automatycznie zakończy swoje działanie, co powoduje, że funkcja `recv()` w odbiorcy zwróci błąd, jeśli nie będzie więcej wiadomości. Można także zakończyć kanał, jeśli w danym wątku nie ma już nadawców.

Listing 4.11: Zakończenie kanału

```

use std::sync::mpsc;
use std::thread;

fn main() {
    let (tx, rx) = mpsc::channel();

    thread::spawn(move || {
        tx.send(String::from("End_of_messages")).expect("Send failed")
        ↪ ;
    });

    match rx.recv() {
        Ok(msg) => println!("Received:{}", msg),
        Err(_) => println!("No more messages!"),
    }
    match rx.recv() {
        Ok(msg) => println!("Received:{}", msg),
        Err(_) => println!("No more messages!"),
    }
}

```

W tym przykładzie 4.11 po wysłaniu wiadomości przez nadawcę wątku głównego, kanał zostaje zamknięty, co sprawia, że dalsze wywołanie recv() w odbiorcy zwróci błąd.

Odpowiedź programu:

```

Received: End of messages
No more messages!

```

4.2.4. Asynchroniczność

Chociaż współbieżność i asynchroniczność nie są tożsame, w Rust oba te podejścia są ze sobąściście powiązane. Rust implementuje asynchroniczność za pomocą konstrukcji takich jak `async/await` oraz bibliotek takich jak Tokio czy `async-std`. Podejście to pozwala na wykonywanie wielu operacji współbieżnie w ramach pojedynczego wątku, eliminując narzut związany z tworzeniem wielu wątków. Podstawowe elementy asynchroniczności to:

- `async / await` - konstrukcje językowe umożliwiające deklaratywne definiowanie funkcji asynchronicznych i ich późniejsze wywoływanie bez blokowania wątku.
- Future - futury, typ reprezentujący wartość, która będzie dostępna w przyszłości. Futures są wykonywane leniwie i wymagają uruchomienia w ramach runtime'u.
- Tokio i `async-std` - najpopularniejsze asynchroniczne runtimes, implementujące własne planistyczne pętle zdarzeń (event loops).
- Asynchroniczne kanały (`tokio::sync::mpsc`, `broadcast`, `oneshot`) - umożliwiają komunikację bez blokowania wątków.
- Asynchroniczne semafory (`tokio::sync::Semaphore`) - pozwalają ograniczyć liczbę jednocześnie wykonywanych zadań asynchronicznych bez blokowania wątku. Są często stosowane do kontroli równoczesnych operacji na zasobach zewnętrznych, takich jak dostęp do bazy danych lub API.

W standardowej bibliotece Rust nie ma semafora, ale tokio udostępnia asynchroniczny semafor (`tokio::sync::Semaphore`), który można również użyć w środowisku wielowątkowym z `tokio::main`.

Listing 4.12: Przykład użycia semafora

```

use tokio::sync::Semaphore;
use std::sync::Arc;
use tokio::task;
use std::time::Duration;

#[tokio::main]
async fn main() {
    let semaphore = Arc::new(Semaphore::new(2)); // maks. 2 ró
    ↪ wnoczesne zasoby
    let mut handles = vec![];

    for i in 0..5 {
        let sem_clone = Arc::clone(&semaphore);
        let handle = task::spawn(async move {
            let permit = sem_clone.acquire().await.unwrap();
            println!("Zadanie {} rozpoczęło pracę", i);

            tokio::time::sleep(Duration::from_secs(1)).await;

            println!("Zadanie {} kończy pracę", i);
            drop(permit); // zwolnienie zasobu
        });
        handles.push(handle);
    }

    for handle in handles {
        handle.await.unwrap();
    }
}

```

W tym przykładzie listing 4.12 semafor o pojemności 2 (`Semaphore::new(2)`) umożliwia maksymalnie dwóm zadaniom równoczesny dostęp do sekcji krytycznej. Pozostałe zadania oczekują w kolejce, aż jedno zezwolenie zostanie zwolnione. `tokio::sync::Semaphore` jest semaforem asynchronicznym (nie blokuje fizycznego wątku), dlatego nadaje się zarówno do środowisk asynchronicznych, jak i do ograniczania zasobów w systemach hybrydowych (np. współbieżno-równoległych).

4.3. Programowanie równoległe

Rust oferuje nowoczesne podejście do programowania równoległego, które pozwala na bezpieczne i wydajne wykorzystanie wielu rdzeni procesora. Dzięki statycznemu systemowi typów, modelowi własności oraz bogatemu ekosystemowi bibliotek, programowanie równoległe w Rust jest zarówno ergonomiczne, jak i odporne na typowe błędy związane z współdzieleniem pamięci.

4.3.1. Biblioteki

Jednym z kluczowych komponentów wspierających programowanie równoległe w Rust jest biblioteka Rayon. Została ona zaprojektowana jako ergonomiczne narzędzie do równoległego

przetwarzania kolekcji oraz rekurencyjnych algorytmów, takich jak mapowanie, filtrowanie czy redukcja. W przeciwieństwie do tradycyjnych podejść wymagających ręcznego tworzenia i zarządzania wątkami, Rayon oferuje wysokopoziomowe abstrakcje, które ukrywają złożoność alokacji wątków oraz synchronizacji, przy zachowaniu bezpieczeństwa typów i braku wyjściów danych.

Przykładowe wykorzystanie biblioteki Rayon może wyglądać następująco:

Listing 4.13: Przykład użycia par_iter

```
use rayon::prelude::*;

fn main() {
    let data = vec![1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8];

    let result: i32 = data
        .par_iter()                      // <- równoległa wersja iteratora
        .map(|x| x * 2)                  // <- równolegle podwijamy każdą
    ↪ wartość
        .reduce(|| 0, |a, b| a + b); // <- redukcja do sumy, start = 0

    println!("Wynik: {}", result); // Oczekiwany wynik: 72
}
```

Kod przedstawiony w listingu 4.13 realizuje prostą operację podwajania wartości elementów wektora oraz ich sumowania, jednak kluczową cechą jest to, że wszystkie operacje wykonywane są równolegle. Funkcja `par_iter()` zamienia standardowy iterator sekwencyjny na jego równoległy odpowiednik, co oznacza, że kolejne elementy będą przetwarzane na wielu rdzeniach procesora w sposób automatyczny i zoptymalizowany przez bibliotekę.

Następnie funkcja `map` pozwala na równolegle zastosowanie tej samej operacji - w tym przypadku mnożenia przez 2 - do każdego elementu kolekcji. Nie wymaga to żadnej ręcznej synchronizacji ani zarządzania współbieżnością — biblioteka zajmuje się podziałem pracy i wykonaniem w sposób optymalny względem dostępnych zasobów sprzętowych.

Ostatni etap przetwarzania to `reduce`, który agreguje wyniki cząstkowe w jeden wynik końcowy. Funkcja ta działa również równolegle: najpierw sumowane są wartości lokalnie (w ramach każdego wątku roboczego), a dopiero potem następuje łączenie tych częściowych sum w jedną finalną wartość. Neutralny element funkcji redukującej to 0, co jest standardowym przypadkiem przy sumowaniu liczb całkowitych.

Cały proces ilustruje typowy model MapReduce, w którym dane są:

- dzielone na fragmenty (ang. *split*),
- transformowane (ang. *map*),
- a następnie agregowane (ang. *reduce*).

4.4. Mechanizmy wspólne dla współbieżności i równoległości

4.4.1. Wątki (std::thread)

Jednym z podstawowych narzędzi oferowanych przez standardową bibliotekę Rust jest moduł `std::thread`, który umożliwia tworzenie niezależnych wątków wykonawczych. Pomimo że zapewnia on niski poziom abstrakcji i bezpośrednią kontrolę nad wątkami, jego użycie wymaga większej ostrożności w kontekście synchronizacji i zarządzania danymi współdzielonymi. Przykładowa konstrukcja:

Listing 4.14: Przykład tworzenia wątku

```
use std::thread;

fn main() {
    let handle = thread::spawn(|| {
        // kod wykonywany równolegle
    });
    handle.join().unwrap();
}
```

W przedstawionym przykładzie listing 4.14 wykorzystano funkcję `thread::spawn`, która tworzy nowy wątek wykonawczy, umożliwiając równoległe przetwarzanie danych lub zadań. Ciało funkcji anonimowej przekazanej do `spawn` zawiera kod, który zostanie wykonany w kontekście nowo utworzonego wątku. Zmienna `handle` przechowuje uchwyt do tego wątku, umożliwiając synchronizację z jego wykonaniem. Wywołanie `handle.join().unwrap()` służy do zablokowania głównego wątku programu do momentu zakończenia pracy wątku potomnego. Metoda `join` zwraca wynik zakończenia wątku.

Tworzenie dużej liczby wątków może być kosztowne zarówno pod względem zasobów systemowych, jak i czasu inicjalizacji. W związku z tym, Rust oferuje mechanizmy pul wątków (ang. *thread pools*), które umożliwiają wielokrotne wykorzystywanie wcześniej zainicjalizowanych wątków do realizacji wielu zadań.

Popularnym rozwiązaniem wspierającym pule wątków jest biblioteka `rayon`, która automatyzuje proces zarządzania wątkami w kontekście równoległego przetwarzania danych. Jednakże, również inne biblioteki, takie jak `tokio` (dla asynchroniczności) czy `async-std`, implementują własne menedżery wątków, umożliwiające bardziej zaawansowane zarządzanie zadaniami.

W celu maksymalizacji wykorzystania zasobów obliczeniowych, wiele implementacji pul wątków w Rust stosuje strategię kradzieży zadań (ang. *work stealing*). Mechanizm ten polega na dynamicznym równoważeniu obciążenia przez umożliwienie wątkom pobierania zadań z kolejek innych wątków, gdy ich własne kolejki są puste. Zwiększa to ogólną wydajność i skraca czas przetwarzania zadań.

Strategia ta znajduje zastosowanie m.in. w implementacji puli wątków biblioteki `rayon`, co czyni ją wysoce wydajną w przypadku zadań o nieregularnym czasie wykonania lub zróżnicowanym poziomie złożoności.

4.4.2. Synchronizacja dostępu (Mutex, RwLock)

Dla sytuacji wymagających współdzielenia pamięci Rust oferuje synchronizowane struktury, takie jak `Mutex` (ang. *mutual exclusion*) oraz `RwLock`. Umożliwiają one zarządzanie dostępem do danych w sposób bezpieczny, jednocześnie wymagając od programisty jawnego określenia momentów blokady i odblokowania zasobów.

Listing 4.15: Przykład użycia Mutex

```
use std::sync::{Arc, Mutex};
use std::thread;

fn main() {
    let counter = Arc::new(Mutex::new(0));

    let mut handles = vec![];

```

```

for _ in 0..10 {
    let counter = Arc::clone(&counter);
    let handle = thread::spawn(move || {
        let mut num = counter.lock().unwrap();
        *num += 1;
    });
    handles.push(handle);
}

for handle in handles {
    handle.join().unwrap();
}

println!("Wartość końcowa: {}", *counter.lock().unwrap());
}

```

Mutex<T> (ang. *mutual exclusion*), czyli wzajemne wykluczanie, to mechanizm blokady umożliwiający bezpieczny dostęp do danych przez wiele wątków. W powyższym przykładzie dane typu i32 są opakowane w Mutex, a następnie udostępniane wielu wątkom za pomocą wskaźnika liczony atomowo Arc<T>. Każdy wątek dokonuje inkrementacji zmiennej wewnętrz sekcji krytycznej, co zapobiega wyścigom danych (ang. data races). Wywołanie lock().unwrap() blokuje wątek do czasu uzyskania wyłącznego dostępu do danych. Podejście to jest typowe w programowaniu zarówno współbieżnym (dla ochrony stanu globalnego), jak i równoległym (dla synchronizacji wyników obliczeń).

Listing 4.16: Przykład użycia RwLock

```

use std::sync::{Arc, RwLock};
use std::thread;

fn main() {
    let data = Arc::new(RwLock::new(vec![1, 2, 3]));

    let reader = {
        let data = Arc::clone(&data);
        thread::spawn(move || {
            let read = data.read().unwrap();
            println!("Odczyt danych: {:?}", read);
        })
    };

    let writer = {
        let data = Arc::clone(&data);
        thread::spawn(move || {
            let mut write = data.write().unwrap();
            write.push(4);
        })
    };

    reader.join().unwrap();
    writer.join().unwrap();
}

```

```

    }
}

```

RwLock<T> (ang. *read-write lock*) czyli blokada odczytu-zapisu, umożliwia wielu wątkom jednoczesny odczyt danych przy zachowaniu wyłączności dla operacji zapisu. W przypadku często czytanych, rzadko modyfikowanych danych, takie rozwiązanie pozwala na lepszą wydajność niż klasyczny Mutex. Biblioteka standardowa Rust zapewnia gwarancje bezpieczeństwa pamięci, eliminując ryzyko naruszeń spójności danych nawet w środowiskach wielordzeniowych.

4.4.3. Wartości atomowe (Atomic*)

Rust obsługuje także operacje na typach atomowych, które pozwalają na wykonywanie niepodzielnych operacji na współdzielonych zmiennych bez potrzeby stosowania bardziej zaawansowanych mechanizmów synchronizacji.

Listing 4.17: Przykład użycia Atomic

```

use std::sync::atomic::{AtomicUsize, Ordering};
use std::thread;

fn main() {
    let counter = AtomicUsize::new(0);

    let handles: Vec<_> = (0..10)
        .map(|_| {
            let counter_ref = &counter;
            thread::spawn(move || {
                for _ in 0..1000 {
                    counter_ref.fetch_add(1, Ordering::Relaxed);
                }
            })
        })
        .collect();

    for handle in handles {
        handle.join().unwrap();
    }

    println!("Wynik: {}", counter.load(Ordering::Relaxed));
}

```

Typy Atomic* w Rust, takie jak AtomicUsize, AtomicBool, czy AtomicPtr, umożliwiają bezpieczne operacje na danych współdzielonych bez stosowania mechanizmów blokujących (ang. *lock-free synchronization*). W przedstawionym przykładzie listing 4.17, funkcja `fetch_add` wykonuje inkrementację wartości w sposób atomowy, zapewniając spójność danych nawet przy równoczesnym dostępie z wielu wątków. Choć `Ordering::Relaxed` zapewnia najmniejszy narzut, istnieją też silniejsze modele spójności pamięci (np. SeqCst, Acquire/Release), które mogą być konieczne przy bardziej złożonych zależnościach.

4.4.4. Bariery

Rust oferuje również podstawowe prymitywy synchronizacyjne, takie jak bariery, które umożliwiają synchronizację wątków w bardziej złożonych scenariuszach. Bariery pozwalają na zsynchronizowanie

chronizowanie grupy wątków, które muszą osiągnąć określony punkt przed kontynuowaniem pracy, natomiast semafory kontrolują dostęp do ograniczonej liczby zasobów.

Listing 4.18: Przykład użycia bariery

```
use std::sync::{Arc, Barrier};
use std::thread;

fn main() {
    let barrier = Arc::new(Barrier::new(3));
    let mut handles = vec![];

    for i in 0..3 {
        let c = Arc::clone(&barrier);
        let handle = thread::spawn(move || {
            println!("Wątek {} przed barierą", i);
            c.wait(); // punkt synchronizacji
            println!("Wątek {} po barierce", i);
        });
        handles.push(handle);
    }

    for handle in handles {
        handle.join().unwrap();
    }
}
```

Barrier (bariera synchronizacyjna) to mechanizm służący do synchronizacji wielu wątków w ustalonym punkcie programu. Każdy wątek, który osiąga barierę, zostaje zablokowany do momentu, aż dojdą do niej wszystkie pozostałe wątki zadeklarowane przy jej utworzeniu. Przykład ten przedstawia trójwątkową synchronizację - żaden z wątków nie przejdzie do fazy „po barierce”, dopóki wszystkie nie osiągną funkcji wait(). Bariera jest przydatna w systemach opartych na etapowym przetwarzaniu, np. w modelu SIMD czy w systemach obliczeń wielofazowych.

Rozdział 5

Wybrane mechanizmy w języku C++

5.1. Programowanie współbieżne

Współbieżność w języku C++ wspierana jest od standardu C++11, który wprowadził szereg struktur i mechanizmów umożliwiających tworzenie i synchronizację wątków. W kolejnych wersjach (C++14, C++17, C++20 i C++23) język został wzbogacony o kolejne narzędzia, zwiększające bezpieczeństwo, ekspresyjność i ergonomię programowania współbieżnego.

5.1.1. Biblioteki i przestrzeń standardowa

`std::thread` oraz `std::jthread`

Standardowa biblioteka języka C++ zawiera podstawowe komponenty do obsługi wątków w module `<thread>`. Wraz z C++20 wprowadzono `std::jthread`, będący bezpieczniejszą alternatywą dla `std::thread`, ponieważ automatycznie dołącza wątek w destruktorze obiektu. Dzięki temu możliwe jest uniknięcie błędów takich jak niezakończony wątek (ang. *orphaned thread*) lub przedwczesne zakończenie programu.

Listing 5.1: Przykład użycia `std::jthread`

```
#include <iostream>
#include <thread>

void worker() {
    std::cout << "Thread_is_running." << std::endl;
}

int main() {
    std::jthread t(worker); // wątek zarządzany automatycznie
    // brak konieczności wywoływania join() lub detach()
}
```

W przykładzie listing 5.1 utworzono nowy wątek wątek z użyciem `std::jthread`, który uruchamia funkcję `worker`. Dzięki automatycznemu zarządzaniu zasobami przez `std::jthread`, nie ma potrzeby ręcznego wywoływania `join()`, co zmniejsza ryzyko błędów synchronizacji.

5.1.2. Komunikacja między wątkami

C++ nie posiada wbudowanych kanałów (ang. *channels*) występujących w języku Rust, lecz umożliwia komunikację poprzez konstrukcje takie jak: kolejki, zmienne warunkowe (`std::condition_variable`) oraz typy atomowe (`std::atomic`). Jednym z najczęstszych wzorców komunikacyjnych jest użycie kolejki chronionej mutexem oraz sygnalizowanej zmienną warunkową.

Listing 5.2: Przykład komunikacji między wątkami

```
#include <iostream>
#include <thread>
#include <queue>
#include <mutex>
#include <condition_variable>

std::queue<int> buffer;
std::mutex mtx;
std::condition_variable cv;

void producer() {
    std::unique_lock<std::mutex> lock(mtx);
    buffer.push(100); // produkcja danych
    cv.notify_one(); // powiadom konsumenta
}

void consumer() {
    std::unique_lock<std::mutex> lock(mtx);
    cv.wait(lock, [] { return !buffer.empty(); }); // czekaj na dane
    std::cout << "Consumed:" << buffer.front() << std::endl;
    buffer.pop(); // usuń dane z kolejki
}
```

Powyższy przykład listing 5.2 implementuje prosty scenariusz producent-konsument. Producent wstawia dane do kolejki i powiadamia wątek oczekujący. Konsument blokuje się, dopóki kolejka nie będzie zawierać danych. Zmienna warunkowa eliminuje konieczność aktywnego sprawdzania warunku (busy waiting), co poprawia efektywność systemu.

5.1.3. Synchronizacja

Synchronizacja w języku C++ opiera się głównie na mutexach (`std::mutex`) oraz ich odmianach. Od C++17 dostępny jest `std::scoped_lock`, pozwalający na bezpieczne blokowanie wielu mutexów jednocześnie, a od C++20 wprowadzono bardziej zaawansowane konstrukty takie jak `std::latch` i `std::barrier`, które umożliwiają synchronizację wielu wątków na określonym etapie wykonania.

Listing 5.3: Przykład użycia `std::scoped_lock`

```
#include <iostream>
#include <thread>
#include <mutex>

int counter = 0;
std::mutex mtx;

void increment() {
```

```

    std::lock_guard<std::mutex> lock(mtx); // automatyczna blokada
    ↪ mutex
    ++counter;
}

int main() {
    std::thread t1(increment);
    std::thread t2(increment);
    t1.join();
    t2.join();
    std::cout << "Counter:" << counter << std::endl;
}

```

W tym przykładzie - listing 5.3 dwa wątki próbują jednocześnie zwiększyć wartość zmiennej counter. Aby zapobiec wyścigowi danych, dostęp do zasobu jest chroniony przez std::mutex. Użycie std::lock_guard zapewnia, że blokada zostanie zwolniona automatycznie po wyjściu z zakresu funkcji.

std::latch oraz std::barrier (C++20)

Mechanizmy std::latch oraz std::barrier wprowadzone w standardzie C++20 służą do synchronizacji wielu wątków w określonym punkcie programu:

- std::latch - jednorazowy licznik synchronizacyjny, który pozwala wątkom oczekującym na rozpoczęcie działania, aż inne wątki zakończą przygotowanie.
- std::barrier - wielokrotnego użytku, synchronizuje grupę wątków po osiągnięciu „cyklu bariery”.

Listing 5.4: Przykład użycia std::latch oraz std::barrier

```

#include <iostream>
#include <thread>
#include <latch>
#include <barrier>

constexpr int num_threads = 3;
std::latch start_latch(num_threads);
std::barrier sync_barrier(num_threads);

void worker(int id) {
    std::cout << "Thread:" << id << " is initializing.\n";
    start_latch.arrive_and_wait(); // czekaj aż wszystkie wątki się
    ↪ przygotują
    for (int i = 0; i < 2; ++i) {
        std::cout << "Thread:" << id << " is processing iteration"
        ↪ << i << ".\n";

        // Synchronizacja między iteracjami
        sync_barrier.arrive_and_wait();

        std::cout << "Thread:" << id << " passed the barrier in"
        ↪ iteration" << i << ".\n";
    }
}

int main() {

```

```

    std::thread threads[num_threads];
    for (int i = 0; i < num_threads; ++i)
        threads[i] = std::thread(worker, i + 1);
    for (auto& t : threads)
        t.join();
}

```

W listingu 5.4 każdy wątek najpierw dochodzi do punktu synchronizacji `std::latch`, oczekując aż wszystkie inne wątki również zakończą fazę inicjalizacji. Następnie, w dwóch kolejnych iteracjach przetwarzania danych, zastosowany zostaje `std::barrier`, który gwarantuje, że wszystkie wątki ukończą daną iterację przed przejściem do kolejnej. Takie podejście zwiększa spójność przetwarzania i eliminuje potencjalne niespójności wynikające z wyścigów czasowych między wątkami.

5.1.4. Asynchroniczność

Programowanie asynchroniczne w C++ możliwe jest dzięki konstrukcjom takim jak `std::async`, `std::future` i `std::promise`. `std::async` uruchamia funkcję w tle i umożliwia jej obserwację za pomocą obiektu `future`. Podejście to ułatwia uruchamianie zadań bez konieczności jawnego zarządzania wątkiem.

Listing 5.5: Przykład użycia `std::async`

```

#include <iostream>
#include <future>

int compute() {
    return 2 * 21;
}

int main() {
    std::future<int> result = std::async(std::launch::async,
                                         compute);
    std::cout << "Result: " << result.get() << std::endl;
}

```

W powyższym listingu 5.5 funkcja `compute()` zostaje uruchomiona asynchronicznie. `std::future` pozwala na uzyskanie wyniku, gdy ten będzie dostępny. W ten sposób możemy kontynuować inne działania, a wynik odebrać w późniejszym czasie — co jest przydatne w aplikacjach wymagających wysokiej responsywności.

`std::promise`

Obiekt `std::promise` (obietnica) w języku C++ umożliwia przekazywanie wartości z jednego wątku do drugiego. Stanowi uzupełnienie mechanizmu `std::future`, ponieważ pozwala manualnie ustawić wartość, którą `future` później odbierze. Dzięki temu rozdzielona zostaje produkcja i konsumpcja danych między wątkami, umożliwiając bardziej elastyczne projektowanie asynchronicznych przepływów sterowania.

Listing 5.6: Przykład użycia `std::promise`

```

#include <iostream>
#include <thread>
#include <future>

```

```

// Funkcja symulująca kosztowne obliczenie
int compute(int x) {
    return x * 2;
}

int main() {
    std::promise<int> promise; // utworzenie obiektu obietnicy
    std::future<int> result = promise.get_future(); // pobranie powią-
        ↪ zanego future

    std::thread producer([&promise]() {
        int value = 21;
        int result = compute(value);
        promise.set_value(result); // ustawienie wartości, która
            ↪ zostanie odebrana przez future
    });

    std::cout << "Result:" << result.get() << std::endl; // odbiór
        ↪ wartości, blokuje do czasu jej ustawienia
    producer.join();

    return 0;
}

```

W listingu 5.6 wątek główny tworzy promise i pobiera powiązany z nim future. Wątek producer wykonuje obliczenie i przekazuje wynik przez promise. Funkcja result.get() wstrzymuje główny wątek do czasu dostępności wyniku.

`std::packaged_task`

`std::packaged_task` to obiekt otaczający dowolną wywoływalną funkcję (np. funkcję, lambda, `std::bind`), który integruje się z `future`. Pozwala to uruchomić zadanie w wątku i obserwować jego wynik.

Listing 5.7: Przykład użycia `std::packaged_task`

```

#include <iostream>
#include <thread>
#include <future>

// Funkcja do opakowania w packaged_task
int compute(int x) {
    return x * 2;
}

int main() {
    std::packaged_task<int(int)> task(compute); // utworzenie
        ↪ zapakowanego zadania
    std::future<int> result = task.get_future(); // pobranie powią-
        ↪ zanego future

    std::thread worker(std::move(task), 21); // uruchomienie zadania
        ↪ w wątku z parametrem 21
}

```

```

    std::cout << "Result: " << result.get() << std::endl; // odbiór
    ↘ wyniku
    worker.join();

    return 0;
}

```

W powyższym przykładzie listing 5.7 funkcja compute została opakowana w `packaged_task`, a następnie uruchomiona w osobnym wątku z argumentem 21. Wynik trafia do `future`, który umożliwia jego odbiór w wątku głównym. przetwarzanie zadań.

C++23 - std::task i std::execution

Standard C++23 (najnowszy w chwili tworzenia niniejszej pracy) wprowadza nowe pojęcia:

- `std::task` - reprezentuje zadanie, które można uruchomić z użyciem określonego planisty wykonania.
- `std::execution` - zestaw polityk (strategii) określających sposób wykonywania zadań, takich jak sekwencyjnie, współbieżnie, równolegle.

Mechanizmy te są częścią trwającej transformacji C++ w kierunku deklaratywnego modelu programowania współbieżnego i równoległego. Mają one zostać wprowadzone wstępnie w wersji C++26 [5] Ponieważ wsparcie dla tych mechanizmów jest na etapie wdrażania, nie będą one szczegółowo omawiane w tej pracy. Warto jednak zauważyć, że ich celem jest uproszczenie i ujednolicenie podejścia do programowania współbieżnego, podobnie jak ma to miejsce w języku Rust.

5.2. Programowanie równoległe

5.2.1. OpenMP - Open Multi-Processing

OpenMP to biblioteka umożliwiająca programowanie równoległe w modelu pamięci współdzielonej. Jest dostępna dla języków C, C++ oraz Fortran i opiera się na użyciu dyrektyw preprocesora (ang. compiler directives) pozwalających na uproszczone rozproszenie zadań pomiędzy wątki w sposób deklaratywny.

Podstawowym celem OpenMP jest ułatwienie implementacji aplikacji równoległych poprzez maksymalne ograniczenie ręcznego zarządzania wątkami i synchronizacją. W kodzie C++ użycie tej technologii wymaga aktywacji flagi `-fopenmp` podczas kompilacji przy użyciu kompilatora `g++`. Przedstawia podstawowe pojęcia:

- `#pragma omp parallel` — dyrektywa inicjująca blok kodu, który ma zostać wykonany równolegle przez wiele wątków,
- `shared` — oznacza zmienne współdzielone pomiędzy wszystkimi wątkami,
- `private` — każdemu wątkowi przypisywana jest prywatna kopia zmiennej,
- `cache locality` — pamięć podręczna (ang. cache) może znacznie poprawić wydajność przetwarzania, choć kosztem większego zużycia pamięci.

Listing 5.8: Przykład użycia OpenMP w C++

```

#include <omp.h>
#include <iostream>

int main() {
    int sum = 0;

```

```
#pragma omp parallel for reduction(+:sum)
for (int i = 1; i <= 100; ++i) {
    sum += i;
}
std::cout << "Suma:" << sum << std::endl;
return 0;
}
```

W powyższym przykładzie w listingu 5.8 zmienna sum jest sumą liczb od 1 do 100 obliczaną równolegle. Dzięki użyciu dyrektywy #pragma omp parallel for każda iteracja pętli może być wykonana w osobnym wątku. Atrybut reduction(+:sum) zapewnia bezpieczne sumowanie wyników lokalnych wątków do jednej wartości globalnej. OpenMP automatycznie zarządza synchronizacją i agregacją wyników, dzięki czemu użytkownik nie musi implementować ręcznego zarządzania zasobami współdzielonymi.

5.2.2. Intel TBB (Threading Building Blocks)

Intel Threading Building Blocks (TBB) to nowoczesna biblioteka programistyczna dla języka C++, przeznaczona do tworzenia aplikacji równoległych w sposób wysoce elastyczny i skalowalny. W przeciwieństwie do OpenMP, TBB opiera się na programowaniu funkcyjnym i komponentowym, umożliwiając dekompozycję zadań (ang. *task-based parallelism*), a nie operacji niskiego poziomu.

Cechy charakterystyczne:

- Deklaratywny styl programowania, który umożliwia oddelegowanie decyzji o wykonaniu do systemu planowania zadań.
- Dynamiczna alokacja wątków w oparciu o dostępność zasobów.
- Wbudowana obsługa synchronizacji oraz struktur danych przystosowanych do środowisk wielowątkowych (np. concurrent_vector, concurrent_queue).

Listing 5.9: Przykład użycia Intel TBB w C++

```
#include <TBB/TBB.h>
#include <iostream>
#include <vector>

int main() {
    std::vector<int> data(1000, 1);
    int sum = 0;

    TBB::parallel_reduce(
        TBB::blocked_range<size_t>(0, data.size()),
        0,
        [&](const TBB::blocked_range<size_t>& r, int local_sum) {
            for (size_t i = r.begin(); i < r.end(); ++i)
                local_sum += data[i];
            return local_sum;
        },
        std::plus<int>()
    );

    std::cout << "Suma:" << sum << std::endl;
    return 0;
}
```

W powyższym przykładzie w listingu 5.9 funkcja TBB::parallel_reduce automatycznie dzieli zakres danych na bloki (blocked_range), które przetwarzane są równolegle przez dostępne wątki. Funkcja lambda odpowiada za lokalne przetwarzanie danych (w tym przypadku sumowanie wartości), a następnie lokalne wyniki są agregowane przy użyciu funkcji std::plus<int>. TBB samodzielnie zarządza planowaniem zadań oraz synchronizacją, co czyni go potężnym narzędziem w budowie skalowalnych aplikacji równoległych.

Rozdział 6

Założenia i metodologia porównania mechanizmów w językach Rust oraz C++

W tym rozdziale przedstawiono metryki oraz algorytmy do analizy wydajności mechanizmów programowania współbieżnego i równoległego w językach Rust oraz C++.

6.1. Programowanie współbieżne

Dla mechanizmów programowania współbieżnego autor nie znalazł obecnie zunifikowanego, powszechnie uznawanego zestawu benchmarków odpowiadający randze NPB. W związku z tym, w ramach niniejszej pracy, opracowano własny zestaw mini-aplikacji testowych, zaprojektowanych w taki sposób, aby odzwierciedlały typowe scenariusze współbieżności: komunikację między wątkami, synchronizację, obsługę asynchronicznych operacji wejścia/wyjścia, sytuacje ryzyka zakleszczenia, a także przypadki intensywnego przetwarzania danych z wykorzystaniem wielu wątków.

6.1.1. Zarządzanie wątkami

Porównanie tworzenia i zarządzania wątkami obejmuje następujące parametry:

- czas tworzenia wątku (w mikrosekundach),
- narzut pamięciowy na wątek (w KB)

6.1.2. Wydajność synchronizacji

Kluczowe aspekty synchronizacji to:

- liczba operacji blokowania i odblokowywania mutexa na sekundę,
- opóźnienie przesyłania wiadomości przez kanały (w mikrosekundach),
- czas przełączania kontekstu pomiędzy wątkami (w mikrosekundach).

6.1.3. Narzut bezpieczeństwa

W kontekście narzutu związanego z mechanizmami bezpieczeństwa w językach Rust i C++ analizowane będą następujące metryki:

- czas komplikacji kodu współbieżnego (w sekundach),
- rozmiar pliku binarnego (w KB),
- zużycie pamięci podczas wykonywania programu (w MB).

6.1.4. Wybrane algorytmy do analizy

Dla porównania mechanizmów współbieżności wybrano następujące algorytmy:

- Model producent-konsument (z wykorzystaniem aktorów),
- Problem filozofów (synchronizacja dostępu do zasobów).

Algorytmy te pozwalają na analizę zdolności języków Rust i C++ do efektywnego zarządzania współbieżnością w obliczeniach numerycznych.

6.2. Programowanie równoległe

W przypadku programowania równoległego, zdecydowano się na wykorzystanie uznanego zestawu testowego NAS Parallel Benchmarks (NPB) [8]. Zestaw ten jest szeroko stosowany w środowisku naukowym do oceny wydajności systemów wysokowydajnych (HPC) i stanowi wiarygodny punkt odniesienia przy analizie efektywności obliczeniowej.

6.2.1. Wydajność obliczeniowa

Główne metryki oceny wydajności algorytmów równoległych to:

- czas wykonania algorytmów równoległych (w milisekundach),
- współczynnik przyspieszenia (T_1/T_n) dla różnych liczby wątków,
- efektywność (przyspieszenie/liczba procesorów).

6.2.2. Wydajność sprzętowa (GFLOP/s)

Wydajność obliczeniowa mierzona w jednostkach GFLOP/s (gigafllops per second) pozwala na ocenę efektywności wykorzystania sprzętu:

- wydajność w pojedynczym wątku,
- wydajność wielowątkowa,
- efektywność skalowania (GFLOP/s na rdzeń).

Dodatkowo przeprowadzona zostanie analiza zgodnie z prawem Amdahla w celu określenia teoretycznych ograniczeń przyspieszenia obliczeń.

6.2.3. Zasoby systemowe

Analiza zużycia zasobów przez algorytmy równoległe obejmuje:

- procentowe wykorzystanie CPU,
- zużycie pamięci w warunkach obciążenia,
- współczynnik nietrafień w cache,
- liczbę operacji wejścia-wyjścia na sekundę.

6.2.4. Wybrane algorytmy do analizy

Dla porównania mechanizmów równoległości wybrano następujące algorytmy z zestawu testowego NPB:

- CG - (ang. *conjugate gradient*) - gradient sprzężony
- EP - (ang. *embarrassingly parallel*) - problem trywialnie równoległy
- IS - (ang. *integer sorting*) - sortowanie liczb całkowitych

Wybór powyższych benchmarków pozwoli na szczegółową analizę wydajności oraz stabilności obu języków w kontekście programowania współbieżnego i równoległego, umożliwiając sformułowanie rekomendacji dotyczących wyboru narzędzi w zależności od specyfiki projektu.

CG - Gradient sprzężony

Benchmark CG (ang. *conjugate gradient*) służy do oceny wydajności systemów wysokowydajnych (HPC) w kontekście rozwiązywania rzadkich układów równań liniowych metodą iteracyjną. Algorytm ten znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauk obliczeniowych, takich jak mechanika płynów czy analiza strukturalna, gdzie układy równań wynikają z dyskretyzacji równań różniczkowych cząstkowych. W benchmarku CG generowana jest syntetyczna macierz rzadkich współczynników o dużych rozmiarach, a następnie przeprowadzana jest iteracyjna procedura wyznaczania przybliżonego rozwiązania układu równań. Test ten charakteryzuje się intensywnym wykorzystaniem operacji wektorowych i punktowych operacji na danych rozproszonych, co czyni go szczególnie użytecznym przy ocenie efektywności komunikacji między wątkami oraz przepustowości pamięci w systemach równoległych [8].

EP - Problem trywialnie równoległy

Benchmark EP (ang. *embarrassingly parallel*) został zaprojektowany w celu oceny wydajności systemów obliczeniowych w scenariuszach, w których niemal całkowicie eliminuje się konieczność komunikacji między procesami lub wątkami. Test ten polega na generowaniu dużej liczby losowych punktów i przeprowadzaniu na nich niezależnych obliczeń statystycznych, takich jak estymacja wartości π lub momentów rozkładu. Dzięki swojej naturze, EP umożliwia niemal idealną skalowalność równoległą i jest wykorzystywany przede wszystkim do pomiaru czystej mocy obliczeniowej procesorów, efektywności rozdziału zadań oraz narzutu wynikającego z zarządzania wątkami. Ze względu na minimalne wymagania względem synchronizacji i komunikacji, benchmark ten stanowi punkt odniesienia przy analizie teoretycznego maksimum wydajności danego systemu dla obciążień równoległych [8].

IS - Sortowanie liczb całkowitych

Benchmark IS (ang. *integer sorting*) służy do oceny wydajności systemów obliczeniowych w zakresie operacji nieciągłych i trudnych do zrównoleglenia, takich jak sortowanie i przemieszczanie danych w pamięci. Test polega na wygenerowaniu losowego zestawu liczb całkowitych, a następnie ich posortowaniu przy użyciu metody sortowania kubełkowego (ang. *bucket sort*) z zastosowaniem rozproszonej synchronizacji i komunikacji między wątkami lub procesami. Benchmark IS jest szczególnie przydatny do analizy przepustowości podsystemów pamięciowych, efektywności komunikacji w architekturach wieloprocesorowych oraz odporności systemu na nierównomierne rozłożenie danych. Ze względu na swoją nieregularną strukturę dostępu do danych i znaczną liczbę operacji porządkowania, IS stanowi istotne uzupełnienie pozostałych testów NPB, koncentrując się na problemach wymagających intensywnej pracy z pamięcią i synchronizacją [8].

6.3. Metodologia badań

Badania eksperymentalne zostały zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwić porównanie mechanizmów współbieżnych i równoległych w językach Rust oraz C++ przy wykorzystaniu dwóch odmiennych architektur sprzętowych: x86_64 (architektura tradycyjna, Windows/Linux) oraz ARM64 (architektura Apple Silicon - M1, macOS). Dzięki temu możliwa będzie analiza wpływu typu procesora i systemu operacyjnego na wydajność oraz efektywność implementacji.

6.3.1. Środowisko testowe

W ramach środowiska testowego zostały wykorzystane następujące urządzenia wraz z oprogramowaniem:

Architektura ARM

W ramach architektury ARM został wykorzystany laptop firmy Apple - MacBook Pro z następującymi specyfikacjami:

- procesor Apple M1
- pamięć RAM 16 GB
- system - macOS Sonoma wersja 14.5 (23F79)

Architektura x86_64

W ramach architektury x86_64 został wykorzystany laptop firmy HP z następującymi specyfikacjami:

- procesor
- pamięć RAM 32 GB
- system - Linux Ubuntu 24.04 LTS

6.3.2. Procedura testowa

Procedura testowa będzie obejmowała uruchomienie zestawu benchmarków w różnych konfiguracjach, takich jak liczba wątków oraz różne klasy algorytmów w przypadku NPB oraz na dwóch architekturach procesora. Każdy test będzie uruchamiany wielokrotnie - 10 razy, aby uzyskać uśrednione wyniki. Algorytmy zawierają również swoje logi zdzarzeń, które zostaną użyte do weryfikacji poprawności działania samego algorytmu jak i do późniejszej analizy wyników.

6.3.3. Narzędzia pomiarowe

W ramach przeprowadzania testów zostaną wykorzystane następujące narzędzia pomiarowe:

- perf - narzędzie do profilowania kodu, które pozwala na analizę wydajności aplikacji w czasie rzeczywistym (jednakże nie jest dostępne na systemach Apple)
- instruments (Xcode) - oficjalne narzędzie do profilowania od firmy Apple - zamiennik narzędzia *perf* w tym przypadku,
- hwloc - narzędzie pozwalające zbadać zachowanie programu jeżeli chodzi o dostęp do podzespołów komputera
- threadsanitizer - flaga do kompilatora (dla języka C++ w tym przypadku), która pozwala sprawdzić czy w fazie kompilowania nie zachodzi sytuacja wyścigów

Rozdział 7

Porównanie między językowe - programowanie równoległe

W ramach programów równoległych wykorzystano jako wzorzec, gotowe implementacje problemów z zestawu NPB w ramach istniejącej pracy The NAS Parallel Benchmarks for evaluating C++ parallel programming frameworks on shared-memory architectures [44] oraz programów bazujących na nich w języku Rust, napisanych w ramach projektu na studia przez G.Bessa et al. [20].

7.1. Implementacje w języku Rust

7.1.1. Struktura i organizacja kodu

Implementacje w języku Rust charakteryzują się proceduralną strukturą podobną do implementacji C++, wykorzystującą globalne stałe i funkcje standalone. Wszystkie benchmarki (EP, CG, IS) następują jednolity wzorzec architektoniczny oparty na funkcji main():

Listing 7.1: Struktura kodu benchmarków w języku Rust

```
pub struct NPBenchmark {
    // Globalne parametry problemu - stałe w czasie kompilacji
    const CLASS: &str = "S";
    const M: u32 = 24;
    const MM: u32 = M - MK;
    const NN: u32 = 1 << MM;
    const NK: usize = 1 << MK;
    const NPBVERSION: &str = "4.1";
    const COMPILETIME: &str = "2024-01-15";

    // Główna funkcja proceduralna
    fn main() {
        let args: Vec<String> = env::args().collect();
        let num_threads = args.get(1)
            .map(|s| s.parse::<usize>().unwrap_or(1))
            .unwrap_or(1);

        // Konfiguracja Rayon thread pool
        rayon::ThreadPoolBuilder::new()
```

```

    .num_threads(num_threads)
    .build_global()
    .unwrap();

    // Proceduralna logika benchmarku
    algorithm_implementation();
    verification_and_results();
}

// Standalone functions operujące na globalnych danych
fn algorithm_implementation() { /* ... */ }
fn verification_and_results() { /* ... */ }

```

Kluczowe cechy organizacji kodu Rust:

- Proceduralna struktura: główna logika w funkcji main() podobnie jak w C++
- Globalne stałe: parametry problemu definiowane jako const w czasie komplikacji
- Standalone functions: logika algorytmu w oddzielnich funkcjach, nie metodach
- Automatyczne zarządzanie pamięcią: Vec<T> zamiast malloc/free
- Rayon integration: jednolite użycie biblioteki Rayon we wszystkich benchmarkach

7.1.2. Zarządzanie pamięcią

Rust wykorzystuje system własności z automatycznym zarządzaniem pamięcią przez Vec<T>, eliminując ręczną alokację:

Listing 7.2: Zarządzanie pamięcią w benchmarkach NPB w języku Rust

```

impl NPBenchmark {
fn main() {
    // Automatyczna alokacja przez Vec<T> - odpowiednik malloc w C++
    let mut key_array: Vec<i32> = vec![0; TOTAL_KEYS];
    let mut key_buff1: Vec<i32> = vec![0; MAX_KEY];
    let mut working_data: Vec<f64> = vec![0.0; PROBLEM_SIZE];

    // Thread-local storage dla bezpieczeństwa współbieżności
    thread_local! {
        static THREAD_X: RefCell<Vec<f64>> = RefCell::new(vec![0.0;
        ↪ NK_PLUS]);
    }

    // Główna logika - Vec<T> automatycznie zarządza pamięcią
    algorithm_core(&mut key_array, &mut working_data);

    // Automatyczna dealokacja po wyjściu z zakresu - brak potrzeby
    ↪ free()
}

fn algorithm_core(data: &mut Vec<i32>, working: &mut Vec<f64>) {
    // Borrowing pozwala na bezpieczny dostęp bez przenoszenia
    ↪ ownership
    parallel_processing(data, working);
}

```

```
// Kompilator gwarantuje brak data races i use-after-free
}
```

Zalety modelu własności:

- Automatyczna dealokacja: Vec<T> zwalnia pamięć automatycznie po wyjściu z zakresu
- Brak wycieków pamięci: gwarancja na poziomie kompilatora
- Abstrakcje bez narzutu kosztów: brak narzutu wydajnościowego
- Bezpieczeństwo wątków: mechanizm sprawdzania pożyczania eliminuje wyścigi danych

7.1.3. Mechanizmy równoległości

Wszystkie implementacje Rust wykorzystują bibliotekę Rayon dla spójnego podejścia do równoległości:

Listing 7.3: Równoległość w benchmarkach NPB w języku Rust

```
use rayon::prelude::*;

fn parallel_computation(data: &mut Vec<f64>, num_threads: usize) {
    // Konfiguracja thread pool - odpowiednik task_scheduler_init w
    ↪ TBB
    rayon::ThreadPoolBuilder::new()
        .num_threads(num_threads)
        .build_global()
        .unwrap();

    // Równoległe przetwarzanie chunks - odpowiednik #pragma omp
    ↪ parallel for
    let results: Vec<_> = data
        .par_chunks_mut(optimal_chunk_size())
        .map(|chunk| process_chunk(chunk))
        .collect();

    // Równoległa redukcja - odpowiednik reduction(+:sum) w OpenMP
    let final_result = data.par_iter()
        .fold(|| 0.0, |acc, &x| acc + compute_element(x))
        .reduce(|| 0.0, |acc1, acc2| acc1 + acc2);
}

fn process_chunk(chunk: &mut [f64]) -> f64 {
    // Bezpieczne przetwarzanie bez mutexów dzięki par_chunks_mut
    // Rayon gwarantuje thread safety przez podział danych
    chunk.iter_mut().map(|x| *x * 2.0).sum()
}
```

- Harmonogram z kradzieżą pracy (ang. *work-stealing scheduler*) - automatyczne równoważenie obciążenia pomiędzy wątkami poprzez dynamiczne przydzielanie zadań.
- Równoległość danych - naturalne ukierunkowanie na przetwarzanie kolekcji danych w sposób równoległy.
- Bezpieczeństwo w czasie kompilacji - brak warunków wyścigu gwarantowany przez mechanizm pożyczania.

- Ergonomiczne API - intuicyjne przekształcenie kodu sekwencyjnego na równoległy bez znacznego zwiększenia złożoności.
- Jednolita abstrakcja: ten sam wzorzec we wszystkich benchmarkach NPB

7.1.4. Specyfika benchmarku EP

Listing 7.4: Implementacja benchmarku EP w języku Rust

```

const CLASS: &str = "S";
const M: u32 = 24;
const MK: u32 = 16;
const MM: u32 = M - MK;
const NN: u32 = 1 << MM;
const NK: usize = 1 << MK;
const NQ: u32 = 10;
const A: f64 = 1220703125.0;
const S: f64 = 271828183.0;

fn main() {
    let args: Vec<String> = env::args().collect();
    let num_threads: usize = args.get(1)
        .map(|s| s.parse::<usize>().unwrap_or(1))
        .unwrap_or(1);

    rayon::ThreadPoolBuilder::new()
        .num_threads(num_threads)
        .build_global()
        .unwrap();

    // Globalne dane - odpowiednik static arrays w C++
    let mut x: Vec<f64> = Vec::with_capacity(NK_PLUS);
    let q: [f64; NQ as usize] = [0.0; NQ as usize];

    // Thread-local storage dla dużych tablic roboczych
    thread_local! {
        static THREAD_X: RefCell<Vec<f64>> = RefCell::new(vec![0.0;
        ↪ NK_PLUS]);
    }

    // Główna pętla równoległa - odpowiednik #pragma omp parallel for
    ↪ reduction
    let result = (1..NN+1)
        .collect::<Vec<_>>()
        .par_chunks(chunk_size)
        .fold(|| (0.0, 0.0), |mut acc, chunk| {
            for &k in chunk {
                THREAD_X.with(|x_cell| {
                    let mut x = x_cell.borrow_mut();
                    randdp::vranlc((2 * NK) as i32, &mut t1, A, &mut x
                    ↪ );
                });
            }
            acc
        });
}

```

```

        // Box-Muller transform w chunks dla lepszej
        ↪ wektoryzacji
        for chunk_start in (0..NK).step_by(CHUNK_SIZE) {
            let chunk_end = (chunk_start + CHUNK_SIZE).min
            ↪ (NK);

            for i in chunk_start..chunk_end {
                let x1 = 2.0 * x[2 * i] - 1.0;
                let x2 = 2.0 * x[2 * i + 1] - 1.0;
                let t1 = x1 * x1 + x2 * x2;

                if t1 <= 1.0 {
                    let t2 = (-2.0 * t1.ln() / t1).sqrt();
                    let t3 = x1 * t2;
                    let t4 = x2 * t2;
                    let l = t3.abs().max(t4.abs()) as
                    ↪ usize;

                    if l < NQ as usize {
                        local_counts[l] += 1;
                        acc.0 += t3;
                        acc.1 += t4;
                    }
                }
            }
        });
    }
    acc
)
.reduce(|| (0.0, 0.0), |mut acc1, acc2| {
    acc1.0 += acc2.0;
    acc1.1 += acc2.1;
    acc1
});
}

// Agregacja wyników
sx = result.0;
sy = result.1;
}

```

7.1.5. Specyfika benchmarku CG

Listing 7.5: Implementacja benchmarku CG w języku Rust

```

const CLASS: &str = "S";
const NA: i32 = 1400;
const NONZER: i32 = 7;

```

```

const NITER: i32 = 15;
const SHIFT: f64 = 10.0;
const NZ: i32 = NA * (NONZER + 1) * (NONZER + 1);

fn main() {
    let num_threads = if args.len() > 1 {
        args[1].parse::<usize>().unwrap_or(1)
    } else { 1 };

    rayon::ThreadPoolBuilder::new()
        .num_threads(num_threads)
        .build_global()
        .unwrap();
}

// Globalne struktury danych - odpowiednik static arrays w C++
let mut colidx: Vec<i32> = vec![0; NZ as usize];
let mut rowstr: Vec<i32> = vec![0; (NA + 1) as usize];
let mut a: Vec<f64> = vec![0.0; NZ as usize];
let mut x: Vec<f64> = vec![1.0; (NA + 2) as usize];
let mut z: Vec<f64> = vec![0.0; (NA + 2) as usize];
let mut p: Vec<f64> = vec![0.0; (NA + 2) as usize];
let mut q: Vec<f64> = vec![0.0; (NA + 2) as usize];
let mut r: Vec<f64> = vec![0.0; (NA + 2) as usize];

// Generowanie macierzy rzadkiej - standalone function
makeea(&mut naa, &mut nzz, &mut a, &mut colidx, &mut rowstr,
        &firstrow, &lastrow, &firstcol, &lastcol,
        &mut arow, &mut acol, &mut aelt, &mut iv, &mut tran, &
        ↪ amult);

// Główna pętla iteracyjna
for it in 1..=NITER {
    conj_grad(&mut colidx, &mut rowstr, &mut x, &mut z, &mut a,
              &mut p, &mut q, &mut r, &mut rnrm, &naa, &lastcol
    ↪ ,
              &firstcol, &lastrow, &firstrow);

    // Równoległe dot products - odpowiednik reduction w OpenMP
    let len = (lastcol - firstcol + 1) as usize;

    norm_temp1 = x[..len]
        .par_iter()
        .zip(&z[..len])
        .map(|(&xi, &zi)| xi * zi)
        .sum();

    norm_temp2 = z[..len]
        .par_iter()
        .map(|&zi| zi * zi)
        .sum();
}

```

```

    // Równoległa aktualizacja wektora x - odpowiednik #pragma omp
    ↪ for
        x[..=(lastcol - firstcol) as usize].par_iter_mut()
            .zip(&z[..=(lastcol - firstcol) as usize])
            .for_each(|(xi, &zi)| {
                *xi = norm_temp2 * zi;
            });
    }
}

// Standalone function - odpowiednik funkcji C
fn conj_grad(colidx: &mut Vec<i32>, rowstr: &mut Vec<i32>,
              x: &mut Vec<f64>, z: &mut Vec<f64>, a: &mut Vec<f64>,
              p: &mut Vec<f64>, q: &mut Vec<f64>, r: &mut Vec<f64>,
              rnrm: &mut f64, /* inne parametry */ {
    let cgitmax: i32 = 25;

    // Sekwencyjna inicjalizacja - jak w C++
    for j in 0..=*nna {
        let j = j as usize;
        q[j] = 0.0;
        z[j] = 0.0;
        r[j] = x[j];
        p[j] = r[j];
    }

    // Równoległe obliczenie rho - odpowiednik #pragma omp for
    ↪ reduction(+:rho)
    rho = (0..=(*lastcol - *firstcol))
        .into_par_iter()
        .map(|j| {
            let idx = j as usize;
            r[idx] * r[idx]
        })
        .sum();

    for _cg in 1..=cgmax {
        // Równoległe mnożenie macierz-wektor - odpowiednik #pragma
        ↪ omp for
        q.par_chunks_mut(1)
            .enumerate()
            .for_each(|(j, q_slice)| {
                if j <= (*lastrow - *firstrow) as usize {
                    let mut sum = 0.0;
                    for k in rowstr[j]..rowstr[j + 1] {
                        let k = k as usize;
                        let cidx = colidx[k];
                        if cidx >= 0 && (cidx as usize) < p.len() {
                            sum += a[k] * p[cidx as usize];
                        }
                    }
                }
            });
    }
}

```

```

        }
    }
    q_slice[0] = sum;
}
});

// Równoległe obliczenie dot product
d = (0..=(*lastcol - *firstcol))
    .into_par_iter()
    .map(|j| {
        let j = j as usize;
        p[j] * q[j]
    })
    .sum();

// Równoległe aktualizacje wektorów
let range = 0..=(*lastcol - *firstcol) as usize;
z[range.clone()].par_iter_mut()
    .zip(&p[range.clone()])
    .for_each(|(z_val, &p_val)| {
        *z_val = *z_val + alpha * p_val;
    });

r[range.clone()].par_iter_mut()
    .zip(&q[range.clone()])
    .for_each(|(r_val, &q_val)| {
        *r_val = *r_val - alpha * q_val;
    });

// Nowe rho z równoległą redukcją
rho = r[range.clone()].par_iter()
    .map(|&r_val| r_val * r_val)
    .sum();
}

}
}

```

7.1.6. Specyfika benchmarku IS

Listing 7.6: Implementacja benchmarku IS w języku Rust

```

const CLASS: &str = "S";
const TOTAL_KEYS_LOG_2: u32 = 16;
const MAX_KEY_LOG_2: u32 = 11;
const NUM_BUCKETS_LOG_2: u32 = 9;
const TOTAL_KEYS: usize = 1 << TOTAL_KEYS_LOG_2;
const MAX_KEY: usize = 1 << MAX_KEY_LOG_2;
const NUM_BUCKETS: usize = 1 << NUM_BUCKETS_LOG_2;

```

```

// Struktura enkapsulująca złożony stan bucket sort - wyjątek od
// proceduralnej reguły
struct ISBenchmark {
    key_array: Vec<KeyType>,
    key_buff1: Vec<KeyType>,
    key_buff2: Vec<KeyType>,
    bucket_size: Vec<Vec<KeyType>>,
    bucket_ptrs: Vec<KeyType>,
    num_threads: usize,
}

impl ISBenchmark {
    fn new(num_threads: usize) -> Self {
        ISBenchmark {
            key_array: vec![0; TOTAL_KEYS],
            key_buff1: vec![0; MAX_KEY],
            key_buff2: vec![0; TOTAL_KEYS],
            bucket_size: vec![vec![0; NUM_BUCKETS]; num_threads],
            bucket_ptrs: vec![0; NUM_BUCKETS + 1],
            num_threads,
        }
    }

    fn rank(&mut self, iteration: i32) {
        let shift = MAX_KEY_LOG_2 - NUM_BUCKETS_LOG_2;

        // Równoległe bucket counting - odpowiednik #pragma omp
        // parallel for
        let chunk_size = (TOTAL_KEYS + self.num_threads - 1) / self.
        // num_threads;

        self.key_array
            .par_chunks(chunk_size)
            .zip(&mut self.bucket_size)
            .for_each(|(chunk, thread_bucket)| {
                for &key in chunk {
                    let bucket_idx = (key >> shift) as usize;
                    if bucket_idx < NUM_BUCKETS {
                        thread_bucket[bucket_idx] += 1;
                    }
                }
            });
    }

    // Równoległe bucket sort z atomics
    (0..NUM_BUCKETS).into_par_iter().for_each(|i| {
        let key_buff1_shared = Arc::new(Mutex::new(&mut self.
        // key_buff1));
        // Complex parallel bucket redistribution
    });
}

```

```

}

fn main() {
    let num_threads = if args.len() > 1 {
        args[1].parse::<usize>().unwrap_or(1)
    } else { 1 };

    rayon::ThreadPoolBuilder::new()
        .num_threads(num_threads)
        .build_global()
        .unwrap();

    let mut benchmark = ISBenchmark::new(num_threads);

    // Proceduralne wywołania na strukturze
    benchmark.create_seq();

    for iteration in 1..=MAX_ITERATIONS {
        benchmark.rank(iteration);
    }

    benchmark.full_verify();
}

```

- Mieszana architektura: **EP** i **CG** są proceduralne, natomiast **IS** posiada strukturę obiektową.
- Enkapsulacja stanu: Złożone struktury danych są definiowane jako **struct** z odpowiadającą im implementacją w **impl**.
- Zarządzanie własnością: Użycie **&mut self** pozwala na bezpieczną modyfikację stanu bez naruszenia reguł współbieżności.
- Bezpieczeństwo wątków: Gwarantowane automatycznie przez system typów i mechanizm pożyczania.

7.2. Implementacje w C++ (OpenMP)

7.2.1. Struktura i organizacja kodu

Implementacje C++ z OpenMP następują klasyczny wzorzec proceduralny wywodzący się z oryginalnych implementacji Fortran:

Listing 7.7: Struktura kodu benchmarków w języku C++ z OpenMP

```

// Globalne zmienne statyczne dla wszystkich benchmarków
#if defined(
    ↪ DO_NOT_ALLOCATE_ARRAYS_WITH_DYNAMIC_MEMORY_AND_AS_SINGLE_DIMENSION
    ↪ )
static DataType primary_array[MAX_SIZE];
static DataType secondary_array[MAX_SIZE];
#else
static DataType (*primary_array)=(DataType*)malloc(sizeof(DataType))*(
    ↪ MAX_SIZE));

```

```

static DataType (*secondary_array)=(DataType*)malloc(sizeof(DataType)
    ↪ *(MAX_SIZE));
#endif

// Funkcje proceduralne operujące na globalnych danych
static void algorithm_core(/* parametry */);
static void initialize_data(/* parametry */);
static void verify_results(/* parametry */);

int main(int argc, char **argv){
    // Główna logika bez enkapsulacji
    initialize_data(/* argumenty */);
    algorithm_core(/* argumenty */);
    verify_results(/* argumenty */);
}

```

- Globalny stan - wszystkie dane przechowywane są jako zmienne globalne, co upraszcza współdzielenie zasobów pomiędzy wątkami.
- Styl proceduralny - funkcje operują bezpośrednio na globalnych strukturach danych, zgodnie z tradycyjnym podejściem programowania proceduralnego.
- Minimalna enkapsulacja - brak hermetyzacji danych i logiki prowadzi do luźnej struktury kodu oraz ograniczonej kontroli nad jego modyfikacjami.
- Kompatybilność wstępna - zachowanie zgodności z kodem Fortran ułatwia migrację i integrację z istniejącymi systemami HPC.
- Warunkowa alokacja - możliwość wyboru pomiędzy alokacją statyczną a dynamiczną umożliwia dostosowanie strategii zarządzania pamięcią do charakterystyki platformy.

7.2.2. Zarządzanie pamięcią

Listing 7.8: Zarządzanie pamięcią w benchmarkach C++ z OpenMP

```

// Warunkowa strategia alokacji pamięci
#if defined(
    ↪ DO_NOT_ALLOCATE_ARRAYS_WITH_DYNAMIC_MEMORY_AND_AS_SINGLE_DIMENSION
    ↪ )
static int colidx[NZ];
static int rowstr[NA+1];
static double a[NZ];
static double x[NA+2];
#else
static int (*colidx)=(int*)malloc(sizeof(int)*(NZ));
static int (*rowstr)=(int*)malloc(sizeof(int)*(NA+1));
static double (*a)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NZ));
static double (*x)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NA+2));
#endif

int main(int argc, char **argv) {
    // Brak sprawdzania błędów alokacji
    // Brak eksplicytnego zwalniania pamięci
    // Potencjalne wycieki pamięci przy wcześniejszym wyjściu

    // Warunkowe zwalnianie (jeśli w ogóle)
}

```

```
#if !defined(  
    ↪ DO_NOT_ALLOCATE_ARRAYS_WITH_DYNAMIC_MEMORY_AND_AS_SINGLE_DIMENSION  
    ↪ )  
// Często brakuje free() calls  
#endif  
}
```

- Ręczne zarządzanie pamięcią - ekspliktyne wywołania `malloc` i `free` bez wsparcia automatyzacji, co zwiększa ryzyko błędów programistycznych.
 - Brak sprawdzania błędów alokacji - operacje przydziału pamięci mogą zakończyć się niepowodzeniem, a ich wyniki często nie są weryfikowane.
 - Wycieki pamięci - brak gwarancji, że zaalokowane zasoby zostaną zwolnione, co prowadzi do stopniowego wzrostu zużycia pamięci.
 - Niezdefiniowane zachowanie - możliwość błędów takich jak *use-after-free* czy *double-free*, które mogą skutkować niestabilnością programu lub lukami bezpieczeństwa.
 - Przekroczenia bufora (buffer overflows) - brak automatycznego sprawdzania granic tablic sprzyja nadpisywaniu pamięci poza przydzielonym obszarem.

7.2.3. Mechanizmy równoległości

Listing 7.9: Mechanizmy równoległości w benchmarkach C++ z OpenMP

```

static void parallel_computation(/* parametry */) {
    double local_sum = 0.0;

    // Klasyczne dyrektywy OpenMP
#pragma omp parallel for reduction(+:local_sum) schedule(
    ↪ static)
    for (int64_t i = 0; i < problem_size; i++) {
        // Równoległe przetwarzanie z ręczną kontrolą
        ↪ synchronizacji
        local_sum += compute_element(i);
    }

    // Sekcje krytyczne dla complex operations
#pragma omp parallel
{
    double thread_local_data[THREAD_ARRAY_SIZE];

    #pragma omp for schedule(dynamic, chunk_size)
    for (int64_t j = 0; j < iterations; j++) {
        // Thread-local processing
    }

    #pragma omp critical
    {
        // Synchronizacja stanu dzielonego
        update_global_results(thread_local_data);
    }
}
}

```

- Oparte na dyrektywach - wykorzystanie konstrukcji `#pragma` do deklaratywnego sterowania równoległością w kodzie źródłowym.
- Ręczna synchronizacja - konieczność samodzielnego zarządzania sekcjami krytycznymi, bariерami oraz mechanizmami ochrony danych współdzielonych.
- Jawne planowanie - programista ma bezpośrednią kontrolę nad strategiami podziału pracy, takimi jak `static`, `dynamic` czy `guided`.
- Model oparty na wątkach - równolełość realizowana przez bezpośrednie zarządzanie wątkami systemowymi, co wpływa na wydajność i kontrolę niskopoziomową.
- Dojrzały ekosystem - bogaty zbiór dyrektyw, opcji konfiguracyjnych i narzędzi wspierających optymalizację oraz profilowanie programów równoległych.

7.2.4. Specyfika benchmarku EP

Listing 7.10: Implementacja benchmarku EP w języku C++ z OpenMP

```

#pragma omp parallel
{
    double t1, t2, t3, t4, x1, x2;
    int kk, i, ik, l;
    double qq[NQ];           // Prywatna kopia q[0:NQ-1]
    double x[NK_PLUS];       // Lokalna tablica na stosie

    for (i = 0; i < NQ; i++) qq[i] = 0.0;

    #pragma omp for reduction(+:sx,sy)
    for(k=1; k<=np; k++){
        kk = k_offset + k;
        t1 = S;
        t2 = an;
        int thread_id = omp_get_thread_num();

        // Znajdowanie ziarna dla tego kk
        for(i=1; i<=100; i++){
            ik = kk / 2;
            if((2*ik)!=kk){t3=randlc(&t1,t2);}
            if(ik==0){break;}
            t3=randlc(&t2,t2);
            kk=ik;
        }

        // Generowanie liczb pseudolosowych
        if(timers_enabled && thread_id==0){timer_start(2);}
        vranlc(2*NK, &t1, A, x);
        if(timers_enabled && thread_id==0){timer_stop(2);}

        // Box-Muller transform
        if(timers_enabled && thread_id==0){timer_start(1);}
        for(i=0; i<NK; i++){
            x1 = 2.0 * x[2*i] - 1.0;
            x2 = 2.0 * x[2*i+1] - 1.0;
            t1 = pow2(x1) + pow2(x2);
            if(t1 <= 1.0){
                t2 = sqrt(-2.0 * log(t1) / t1);
                x[2*i] = x1 * t2;
                x[2*i+1] = x2 * t2;
            }
        }
    }
}

```

```

        t3 = (x1 * t2);
        t4 = (x2 * t2);
        l = max(fabs(t3), fabs(t4));
        qq[l] += 1.0;
        sx = sx + t3;
        sy = sy + t4;
    }
}
if (timers_enabled && thread_id==0){timer_stop(1);}
}

#pragma omp critical
{
    for (i = 0; i <= NQ - 1; i++) q[i] += qq[i];
}
}

```

7.2.5. Specyfika benchmarku CG

Listing 7.11: Implementacja benchmarku CG w języku C++ z OpenMP

```

// Globalne zmienne statyczne - identyczne w OpenMP i TBB
#ifndef defined(
    #define DO_NOT_ALLOCATE_ARRAYS_WITH_DYNAMIC_MEMORY_AND_AS_SINGLE_DIMENSION
)
static int colidx[NZ];
static int rowstr[NA+1];
static int iv[NA];
static int arow[NA];
static int acol[NAZ];
static double aelt[NAZ];
static double a[NZ];
static double x[NA+2];
static double z[NA+2];
static double p[NA+2];
static double q[NA+2];
static double r[NA+2];
#else
static int (*colidx)=(int*)malloc(sizeof(int)*(NZ));
static int (*rowstr)=(int*)malloc(sizeof(int)*(NA+1));
static int (*iv)=(int*)malloc(sizeof(int)*(NA));
static int (*arow)=(int*)malloc(sizeof(int)*(NA));
static int (*acol)=(int*)malloc(sizeof(int)*(NAZ));
static double (*aelt)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NAZ));
static double (*a)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NZ));
static double (*x)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NA+2));
static double (*z)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NA+2));
static double (*p)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NA+2));
static double (*q)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NA+2));
static double (*r)=(double*)malloc(sizeof(double)*(NA+2));
#endif

int main(int argc, char **argv){

```

```

// Inicjalizacja bez sprawdzania błędów
makea(naa, nzz, a, colidx, rowstr, firstrow, lastrow, firstcol,
      ↪ lastcol,
      arow, (int(*)[NONZER+1])(void*)acol,
      (double(*)[NONZER+1])(void*)aelt, iv);

// Główna pętla iteracyjna
for(it = 1; it <= NITER; it++){
    if(timeron){timer_start(T_CONJ_GRAD);}
    conj_grad(colidx, rowstr, x, z, a, p, q, r, &rnorm);
    if(timeron){timer_stop(T_CONJ_GRAD);}

    // Sekwencyjne obliczenia norm
    norm_temp1 = 0.0;
    norm_temp2 = 0.0;
    for(j = 0; j < lastcol - firstcol + 1; j++){
        norm_temp1 = norm_temp1 + x[j]*z[j];
        norm_temp2 = norm_temp2 + z[j]*z[j];
    }
    norm_temp2 = 1.0 / sqrt(norm_temp2);
    zeta = SHIFT + 1.0 / norm_temp1;

    // Sekwencyjna aktualizacja x
    for(j = 0; j < lastcol - firstcol + 1; j++){
        x[j] = norm_temp2 * z[j];
    }
}

static void conj_grad(int colidx[], int rowstr[], double x[], double
      ↪ z[],
      double a[], double p[], double q[], double r
      ↪ [],
      double* rnorm){
int j, k;
int cgit, cgitmax;
double d, sum, rho, rho0, alpha, beta;

cgitmax = 25;
rho = 0.0;

// Sekwencyjna inicjalizacja
for(j = 0; j < naa+1; j++){
    q[j] = 0.0;
    z[j] = 0.0;
    r[j] = x[j];
    p[j] = r[j];
}

// OpenMP: Równoległe obliczenie rho
#pragma omp parallel for reduction(+:rho)
for(j = 0; j < lastcol-firstcol+1; j++){
    rho += r[j]*r[j];
}

```

```

}

for(cgit = 1; cgit <= cgitmax; cgit++){
    // OpenMP: Równoległe mnożenie macierz-wektor
    #pragma omp parallel for
    for(j = 0; j < lastrow-firstrow+1; j++) {
        double sum = 0.0;
        for(k = rowstr[j]; k < rowstr[j+1]; k++) {
            sum = sum + a[k]*p[colidx[k]];
        }
        q[j] = sum;
    }

    // OpenMP: Równoległe obliczenie dot product
    d = 0.0;
    #pragma omp parallel for reduction(+:d)
    for (j = 0; j < lastcol-firstcol+1; j++) {
        d += p[j]*q[j];
    }

    alpha = rho / d;
    rho0 = rho;
    rho = 0.0;

    // OpenMP: Równoległe aktualizacje wektorów z redukcją
    #pragma omp parallel for reduction(+:rho)
    for(j = 0; j < lastcol-firstcol+1; j++) {
        z[j] += alpha*p[j];
        r[j] -= alpha*q[j];
        rho += r[j]*r[j];
    }

    beta = rho / rho0;

    // OpenMP: Równoległa aktualizacja p
    #pragma omp parallel for
    for(j = 0; j < lastrow-firstrow+1; j++) {
        p[j] = r[j] + beta*p[j];
    }

    // Obliczenie residuum
    sum = 0.0;
    #pragma omp parallel for
    for(j = 0; j < lastrow-firstrow+1; j++) {
        double d = 0.0;
        for(k = rowstr[j]; k < rowstr[j+1]; k++) {
            d = d + a[k]*z[colidx[k]];
        }
        r[j] = d;
    }

    #pragma omp parallel for reduction(+:sum)

```

```

for(j = 0; j < lastcol-firstcol+1; j++) {
    double d = x[j] - r[j];
    sum += d*d;
}

*rnorm = sqrt(sum);
}

```

7.2.6. Specyfika benchmarku IS

Listing 7.12: Implementacja benchmarku IS w języku C++ z OpenMP

```

static void rank(/* parametry */) {
    // Parallel histogram construction
    #pragma omp parallel
    {
        int key_buff_ptr[MAX_KEY];

        #pragma omp for
        for (int i = 0; i < num_keys; i++) {
            key_buff_ptr[key_buff[i]]++;
        }

        // Complex synchronization for bucket sort
        #pragma omp barrier

        #pragma omp for
        for (int i = 0; i < num_buckets; i++) {
            // Redistribute keys
        }
    }
}

```

7.3. Implementacje w C++ (TBB)

7.3.1. Struktura i organizacja kodu

Implementacje TBB zachowują proceduralną strukturę z minimalnymi modyfikacjami względem wersji OpenMP:

Listing 7.13: Implementacja TBB - struktura kodu

```

#include "TBB/parallel_for.h"
#include "TBB/parallel_reduce.h"
#include "TBB/blocked_range.h"
#include "TBB/task_scheduler_init.h"
#include "TBB/mutex.h"

// Identyczne globalne zmienne jak w wersji OpenMP
#if defined(
    ↳ DO_NOT_ALLOCATE_ARRAYS_WITH_DYNAMIC_MEMORY_AND_AS_SINGLE_DIMENSION
    ↳ )
static DataType primary_array[MAX_SIZE];

```

```

static DataType secondary_array[MAX_SIZE];
#else
static DataType (*primary_array)=(DataType*)malloc(sizeof(DataType)*(  

    ↪ MAX_SIZE));
static DataType (*secondary_array)=(DataType*)malloc(sizeof(DataType)  

    ↪ *(MAX_SIZE));
#endif

int main(int argc, char **argv){
    // Inicjalizacja TBB scheduler
    int num_workers;
    if(const char * nw = std::getenv("TBB_NUM_THREADS")) {
        num_workers = atoi(nw);
    } else {
        num_workers = 1;
    }

    TBB::task_scheduler_init init(num_workers);

    // Reszta kodu identyczna jak w wersji klasycznej
    algorithm_implementation();
}

```

- Minimalne zmiany strukturalne - zachowanie proceduralnego stylu programowania bez konieczności znaczącej przebudowy istniejącego kodu.
- Jawna inicjalizacja planisty zadań - konieczność ręcznego utworzenia i konfiguracji obiektu planisty (`task_scheduler_init`) w celu zarządzania wątkami.
- Równoległość oparta na funkcjach - zastąpienie dyrektyw kompilatora wywołaniami funkcji bibliotecznych, takich jak `parallel_for` czy `parallel_reduce`.
- Te same problemy z zarządzaniem pamięcią - biblioteka nie wprowadza dodatkowych zabezpieczeń; nadal istnieje ryzyko błędów takich jak wycieki pamięci, przekroczenia bufora czy dostęp do już zwolnionej pamięci.

7.3.2. Zarządzanie pamięcią

TBB nie wprowadza ulepszeń w zarządzaniu pamięcią - wykorzystuje identyczny model jak OpenMP z tymi samymi problemami.

7.3.3. Mechanizmy równoległości

TBB zastępuje dyrektywy OpenMP funkcyjnym API z work-stealing scheduler:

Listing 7.14: Implementacja TBB - równoległość

```

// Zastąpienie OpenMP reduction przez TBB parallel_reduce
static void parallel_computation(/* parametry */) {
    // Parallel reduction z lambda expressions
    double result = TBB::parallel_reduce(
        TBB::blocked_range<size_t>(0, problem_size),
        0.0,
        [&](const TBB::blocked_range<size_t>& r, double worker_sum){
            for (size_t i = r.begin(); i != r.end(); i++) {
                worker_sum += compute_element(i);
            }
        }
    );
}

```

```

    }
    return worker_sum;
},
std::plus<double>()
);

// Parallel for z blocked ranges
TBB::parallel_for(
    TBB::blocked_range<size_t>(0, iterations),
    [&](const TBB::blocked_range<size_t>& r){
        for (size_t i = r.begin(); i != r.end(); i++) {
            process_iteration(i);
        }
    }
);
}
}

```

- Funkcyjny interfejs programowania - zastosowanie wyrażeń lambda i funkcji wyższego rzędu zamiast dyrektyw kompilatora, co sprzyja większej elastyczności kompozycyjnej.
- Harmonogram z kradzieżą pracy (ang. *work-stealing scheduler*) - automatyczne równoważenie obciążenia pomiędzy wątkami poprzez dynamiczne przydzielanie zadań zależnie od dostępnych zasobów.
- Podziały blokowe - automatyczny podział przestrzeni danych na zakresy, co ułatwia równoległe przetwarzanie dużych kolekcji bez konieczności ręcznego zarządzania iteracjami.
- Bezpieczeństwo typów - silniejsze mechanizmy typowania w porównaniu do OpenMP, co zmniejsza liczbę błędów w czasie komplikacji.
- Większy narzut składniowy - bardziej rozwlekła i złożona składnia niż w przypadku OpenMP, co może wpływać na czytelność i prostotę kodu.

7.3.4. Specyfika poszczególnych benchmarków

TBB implementacje różnią się głównie sposobem wyrażenia równoległości, zachowując identyczną logikę algorytmów:

- EP: Zastąpienie #pragma omp for reduction przez parallel_reduce z lambda
- CG: Konwersja sparse matrix operations na parallel_for z blocked_range
- IS: Implementacja bucket sort przez parallel_for z mutex synchronization

7.4. Implementacje w C++ (nowoczesne podejście)

7.4.1. Struktura i organizacja kodu

Nowoczesne implementacje C++ wykorzystują obiektowy design z RAII i enkapsulacją:

Listing 7.15: Implementacja nowoczesnego C++ - struktura kodu

```

namespace npb {

class NPBBenchmark {
public:
    explicit NPBBenchmark(char class_type, int num_threads = 1);
    virtual ~NPBBenchmark() = default;
}

```

```

    virtual void run() = 0;
    virtual bool verify() const = 0;
    virtual double get_mops() const = 0;

protected:
    // Enkapsulowane dane z automatycznym zarządzaniem
    struct ProblemParameters {
        int64_t size;
        char class_type;
        int iterations;
    } params_;

    // RAII dla wszystkich zasobów
    std::vector<double> primary_data_;
    std::vector<double> secondary_data_;

    // Wyniki i stan
    BenchmarkResults results_;
    bool verified_ = false;
    bool timers_enabled_ = false;
    int num_threads_;

private:
    virtual void init() = 0;
    virtual void compute() = 0;
    virtual bool verify_results() = 0;
};

class EPBenchmark : public NPBBenchmark {
    // Konkretna implementacja
};
}

```

- RAII (Resource Acquisition Is Initialization) - automatyczne zarządzanie zasobami przy użyciu konstruktorów i destruktów, co eliminuje potrzebę jawnego zwalniania pamięci oraz innych zasobów systemowych.
- Enkapsulacja - hermetyzacja danych oraz logiki w obrębie klas i struktur, co sprzyja modułarności, izolacji błędów i możliwości wielokrotnego wykorzystania kodu.
- Bezpieczeństwo typów - wykorzystanie nowoczesnych konstrukcji językowych C++, takich jak typy wyliczeniowe, silne typowanie i szablony, pozwalające na wczesne wykrywanie błędów.
- Zarządzanie zasobami - użycie inteligentnych wskaźników (`std::unique_ptr`, `std::shared_ptr`) oraz kontraktów programistycznych (np. `noexcept`, `[[nodiscard]]`), co zwiększa niezawodność i bezpieczeństwo kodu.

7.4.2. Zarządzanie pamięcią

Listing 7.16: Implementacja nowoczesnego C++ - zarządzanie pamięcią

```

class NPBBenchmark {
private:
    // std::vector automatycznie zarządza pamięcią

```

```

    std::vector<double> data_;
    std::vector<int64_t> indices_;
    std::unique_ptr<WorkingMemory> working_memory_;

public:
explicit NPBBenchmark(const ProblemParameters& params)
    : params_(params),
      data_(params.size),
      indices_(params.index_size),
      working_memory_(std::make_unique<WorkingMemory>(params)) {
    // Automatyczna inicializacja z exception safety
    init_data_structures();
}

void worker_task(int tid, int num_workers) {
    // Automatyczne zarządzanie lokalnych zasobów
    std::vector<double> local_working_array(params_.local_size);
    std::vector<double> local_results(params_.result_size, 0.0);

    // RAII gwarantuje cleanup nawet przy wyjątkach
    process_local_data(local_working_array, local_results);

    // Thread-safe aggregation
    aggregate_results(local_results);
}

// Destruktor automatycznie zwalnia wszystkie zasoby
~NPBBenchmark() = default;
};

```

7.4.3. Mechanizmy równoległości

Listing 7.17: Implementacja nowoczesnego C++ - równoległość

```

class NPBBenchmark {
    protected:
        void parallel_computation() {
            // Modern C++ threading z RAII
            std::vector<std::thread> threads;
            threads.reserve(num_threads_);

            // Exception-safe thread management
            try {
                for (int i = 0; i < num_threads_; i++) {
                    threads.emplace_back([this, i]() {
                        this->worker_task(i, num_threads_);
                    });
                }

                // RAII ensures proper cleanup
                for (auto& thread : threads) {
                    thread.join();
                }
            }
        }
    
```

```

    } catch (...) {
        // Exception safety - cleanup threads
        for (auto& thread : threads) {
            if (thread.joinable()) {
                thread.join();
            }
        }
        throw;
    }
}

void thread_safe_aggregation(const LocalResults& local) {
    // Modern synchronization primitives
    std::lock_guard<std::mutex> lock(results_mutex_);
    results_.aggregate(local);
}
};

```

7.5. Porównanie międzyjęzykowe

7.5.1. Architektura i organizacja kodu

Tab. 7.1: Porównanie aspektów zarządzania i organizacji kodu w Rust i różnych stylach C++

Aspekt	Rust	C++ (OpenMP)	C++ (TBB)	C++ (nowoczesny)
Organizacja kodu	Mieszana: IS obiektowy, EP/CG proceduralne	Proceduralna, globalna	Proceduralna, globalna	Obiektowa, enkapsulowana
Zarządzanie stanem	Ownership + borrowing	Zmienne globalne	Zmienne globalne	RAII + smart pointers
Enkapsulacja	Wysoka (moduły + traits)	Brak	Brak	Średnia (klasy)
Bezpieczeństwo typów	Compile-time guarantees	Runtime checks	Runtime checks	Mixed approach
Obsługa błędów	Result<T, E> + Option<T>	Minimalna / brak	Minimalna / brak	Wyjątki + std::optional
Bezpieczeństwo pamięci	Gwarantowane	Ręczne zarządzanie	Ręczne zarządzanie	RAII-based

7.5.2. Zarządzanie pamięcią

Tab. 7.2: Porównanie modelu alokacji i bezpieczeństwa pamięci w Rust i różnych stylach C++

Aspekt	Rust	C++ (OpenMP)	C++ (TBB)	C++ (nowoczesny)
Model alokacji	Automatyczny (ownership)	Ręczny (malloc/free)	Ręczny (malloc/free)	Automatyczny (std::vector)
Wycieki pamięci	Niemogliwe	Mogliwe	Mogliwe	Rzadkie (RAII)
Use-after-free	Niemogliwe	Mogliwe	Mogliwe	Rzadkie
Przepełnienia bufora	Sprawdzanie granic	Mogliwe	Mogliwe	Sprawdzanie granic
Podwójne zwolnienie	Niemogliwe	Mogliwe	Mogliwe	Rzadkie

Rozdział 8

Porównanie między językowe - programowanie współbieżne

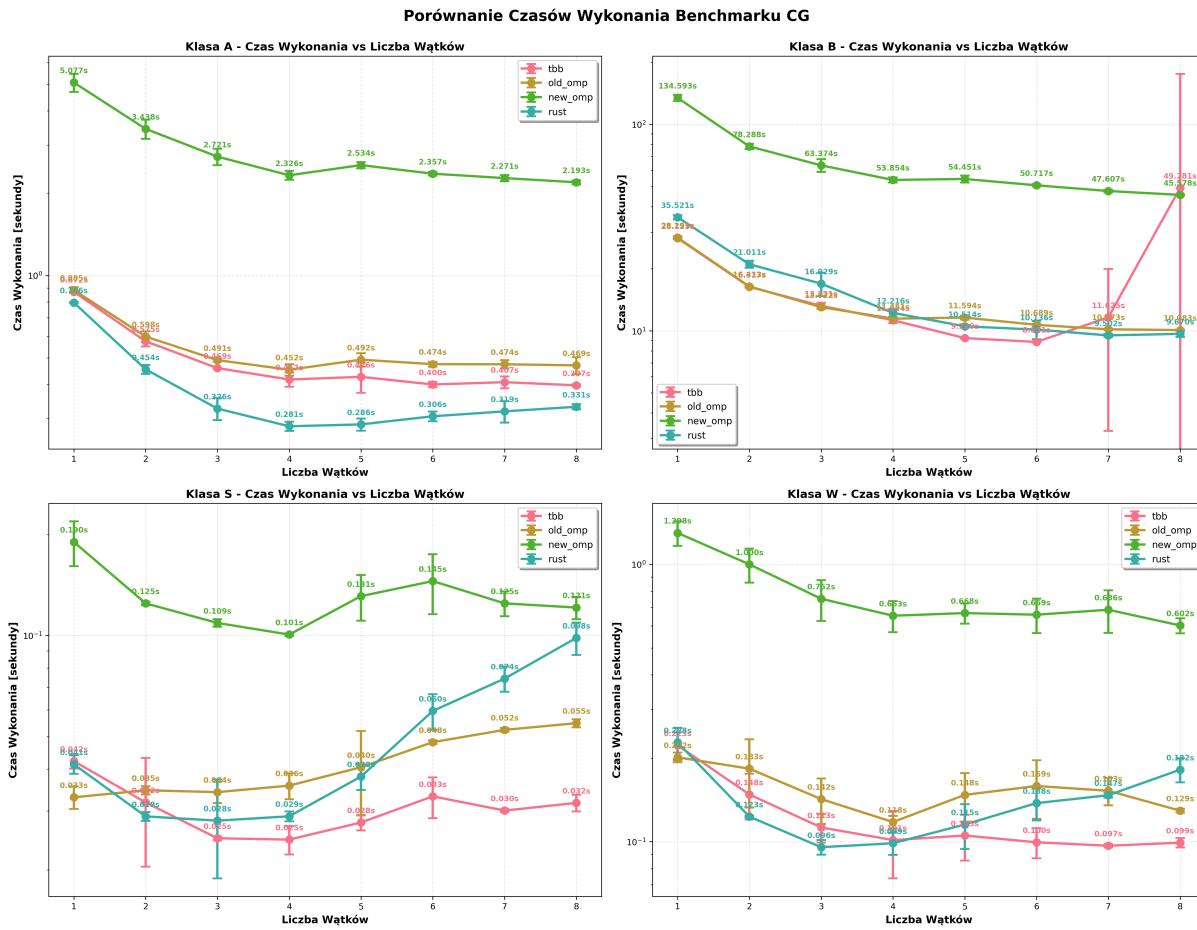
Rozdział 9

Analiza wyników - programowanie równoległe

W tym rozdziale zostały zebrane wyniki testów, które porównują ze sobą mechanizmy programowania równoległego w językach Rust i C++.

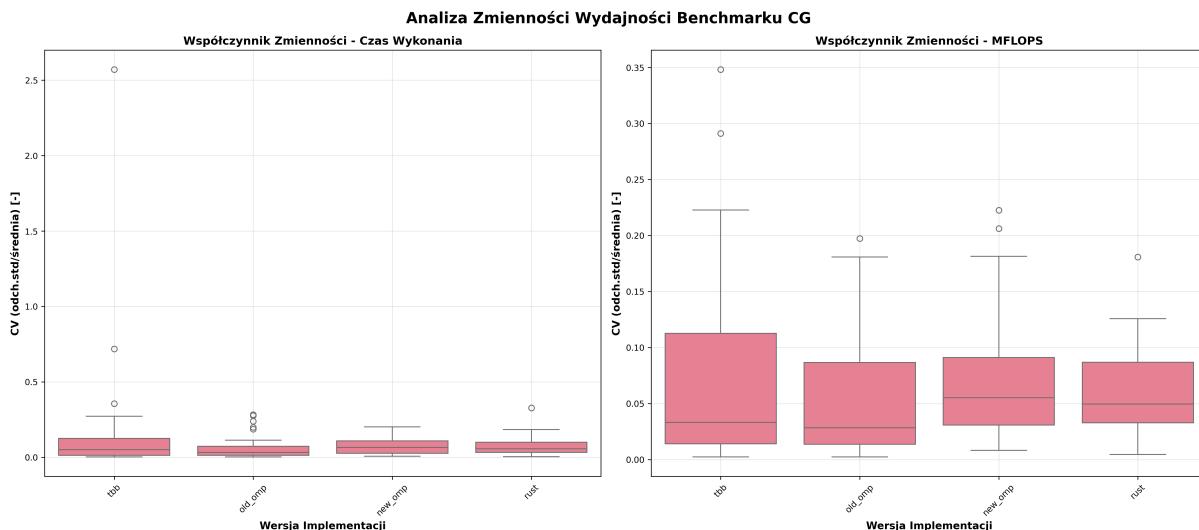
9.1. Benchmark CG

9.1.1. Wyniki benchmarków - platforma ARM64



Rys. 9.1: Porównanie czasów wykonania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

Na rysunku 9.1 zaprezentowano zestawienie czasów wykonania benchmarku CG dla czterech klas problemu: S, W, A oraz B, przy użyciu czterech różnych implementacji równoległości: TBB, OpenMP w wersji oryginalnej w stylu języka Fortran (old_omp), OpenMP w wersji nowszej (new_omp) oraz implementacji w języku Rust. Dla każdej z klas przedstawiono zależność czasu wykonania od liczby wątków (od 1 do 8). Wartości zostały zaprezentowane w skali logarytmicznej.



Rys. 9.2: Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

Powyższy wykres - rysunek 9.2 pudełkowy prezentuje współczynnik zmienności (ang. *CV - coefficient of variation*), obliczony jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej, w odniesieniu do czasu wykonania (lewy wykres) oraz uzyskiwanej wydajności (prawy wykres) dla różnych wersji implementacji benchmarku.

Klasa A

Dla klasy A obserwuje się istotne skrócenie czasu wykonania w miarę zwiększania liczby wątków we wszystkich implementacjach. Najlepsze wyniki osiąga implementacja w języku Rust, która przy dwóch wątkach wykazuje już znaczną poprawę, a dalsze zwiększenie liczby wątków prowadzi do stopniowego, choć już mniej dynamicznego, spadku czasu wykonania. Implementacje oparte na TBB oraz new_omp osiągają porównywalne wyniki, przy czym TBB zyskuje przewagę przy większej liczbie wątków. old_omp charakteryzuje się najmniejszą efektywnością spośród rozważanych technologii

Klasa B

W przypadku klasy B, reprezentującej znacznie większy problem obliczeniowy, wszystkie implementacje wykazują duże korzyści z równoległości do około 4-5 wątków. Najlepsze rezultaty osiąga new_omp oraz Rust, które utrzymują stabilny i niski czas wykonania dla większej liczby wątków. Implementacja TBB wykazuje niejednorodne zachowanie, a przy 8 wątkach dochodzi do gwałtownego wzrostu czasu wykonania i odchylenia standardowego, co może świadczyć o problemach z równoważeniem obciążenia (ang. *load balancing*). old_omp stabilizuje się przy wyższym poziomie czasów wykonania, ale nie wykazuje znaczącej degradacji.

Klasa S

Dla klasy S, reprezentującej mały problem obliczeniowy, dominującą jest implementacja w języku Rust, osiągającą najniższe czasy wykonania dla niemal wszystkich liczb wątków. Warto zauważyć, że dla tej klasy problemu korzyści ze zwiększania liczby wątków są ograniczone, a różnice pomiędzy implementacjami są bardziej subtelne. TBB oraz new_omp oferują porównywalne wyniki, podczas gdy old_omp utrzymuje wyższe wartości czasów, co sugeruje niższą efektywność dla małych problemów.

Klasa W

Dla klasy W obserwuje się podobny trend jak w klasie S, lecz z bardziej widoczną poprawą wydajności przy zwiększaniu liczby wątków. Rust oraz TBB osiągają najniższe czasy wykonania, z przewagą Rusta przy mniejszej liczbie wątków oraz TBB dla konfiguracji 6-8 wątków. old_omp po raz kolejny okazuje się najmniej wydajnym rozwiązaniem. new_omp wykazuje stabilne, ale umiarkowane czasy wykonania.

Współczynnik zmienności - czas wykonania

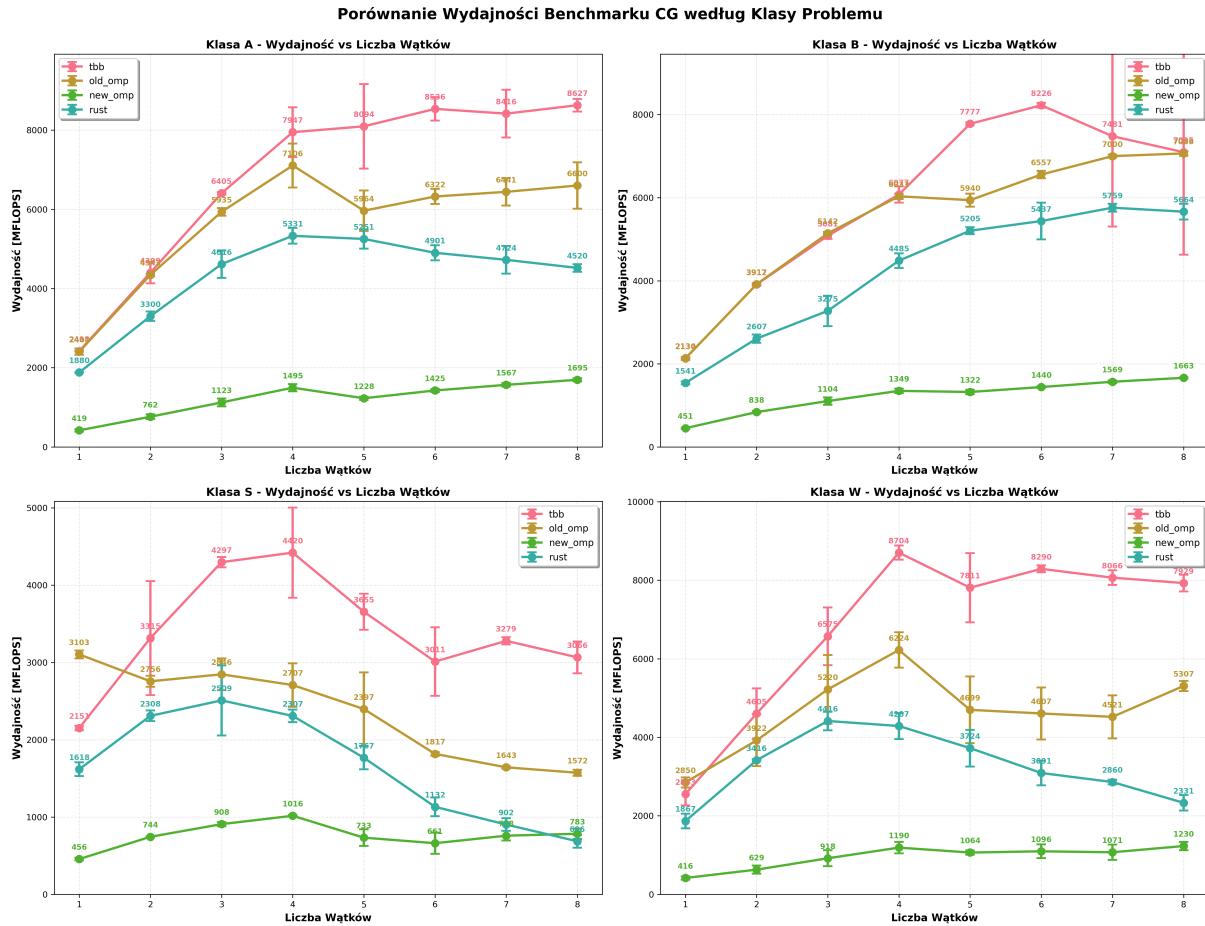
Na lewym wykresie - rysunek 9.2 zaobserwować można, że implementacja tbb cechuje się najwyższą zmiennością czasu wykonania. Występują dla niej wartości odstające dochodzące nawet do $CV > 2.5$, co może wskazywać na niestabilność działania w wybranych konfiguracjach (np. liczba wątków lub klasa problemu). Mediana wartości CV dla tbb pozostaje jednak niska, co oznacza, że większość przypadków wykazuje umiarkowaną stabilność.

Pozostałe implementacje (old_omp, new_omp, rust) charakteryzują się wyraźnie niższą zmiennością czasu wykonania. Dla old_omp widocznych jest kilka wartości odstających, ale ogólny rozkład jest bardziej zwarty. new_omp i rust prezentują podobny poziom zmienności, z medianami bliskimi zera i niewielką rozpiętością wartości, co potwierdza ich stabilność obliczeniową.

Współczynnik zmienności - MFLOPS

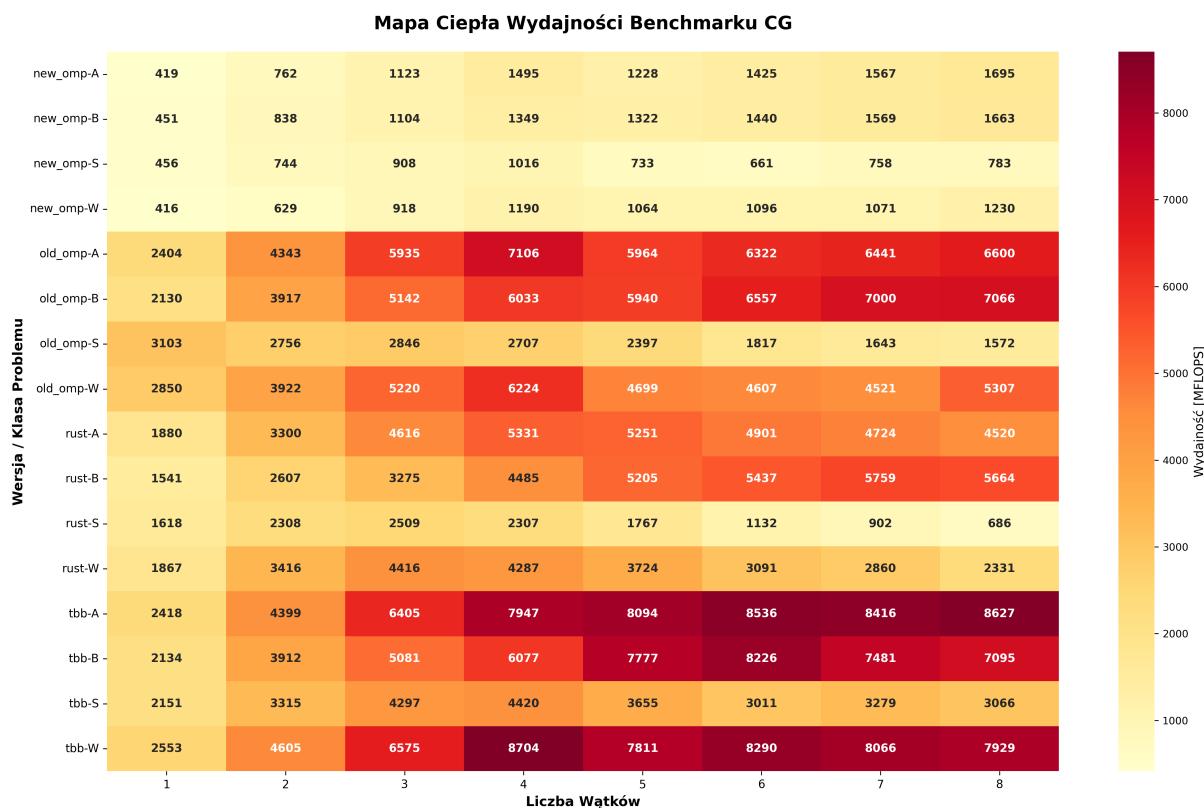
Na prawym wykresie - rysunek 9.2 porównano zmienność względną wydajności mierzonej w MFLOPS. Również tutaj tbb wykazuje najwyższy rozrzut wyników, z wieloma obserwacjami odstającymi, choć mediana nadal pozostaje niska (około 0.03). Może to oznaczać, że w specyficznych warunkach (np. przy większym obciążeniu systemu) tbb jest podatne na spadki wydajności.

W przypadku old_omp, new_omp i rust rozkłady CV są bardziej zwarte. rust oraz new_omp mają bardzo zbliżone mediany (0.03-0.04) i umiarkowaną zmienność, co wskazuje na przewidywalność osiąganej wydajności. old_omp, mimo że często charakteryzował się niższą bezwzględną wydajnością (jak pokazano w poprzednich analizach), okazuje się względnie stabilny w kontekście MFLOPS.



Rys. 9.3: Porównanie wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

Na wykresach na rysunku 9.3 zaprezentowano porównanie wydajności benchmarku CG mierzonej w MFLOPS (milionach operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę). Wydajność została przedstawiona jako funkcja liczby wątków (1-8) dla czterech implementacji równoległych.



Rys. 9.4: Mapa ciepła wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

Powyższa mapa cieplna - rysunek 9.4 przedstawia wydajność (w MFLOPS). Wydajność została przedstawiona w zależności od liczby użytych wątków. Odcienie koloru od żółtego do ciemnoczerwonego wskazują na wzrost wydajności.

Klasa A

W klasie A najwyższą wydajność osiąga implementacja tbb, która systematycznie poprawia wyniki aż do 8 wątków, gdzie osiąga wartość 8627 MFLOPS. old_omp również wykazuje dobry skalowanie, osiągając 6600 MFLOPS przy 8 wątkach. rust oraz new_omp wypadają wyraźnie słabiej — rust stabilizuje się w przedziale 4500-5300 MFLOPS, natomiast new_omp osiąga wartość maksymalną około 1700 MFLOPS. Sugeruje to, że tbb oraz old_omp są znacznie bardziej efektywne w przetwarzaniu większych danych w tej klasie.

Klasa B

Dla klasy B, która reprezentuje większy problem obliczeniowy niż klasa A, trendy są podobne. tbb ponownie osiąga najwyższą wydajność (8226 MFLOPS przy 6 wątkach), z niewielkim spadkiem po przekroczeniu tej liczby. old_omp zachowuje się stabilnie i osiąga porównywalne wartości — do 7066 MFLOPS przy 8 wątkach. rust poprawia wydajność aż do 7 wątków (5759 MFLOPS), po czym następuje niewielki spadek. new_omp, choć bardziej stabilny, pozostaje najmniej wydajny w tej klasie (maksymalnie 1663 MFLOPS).

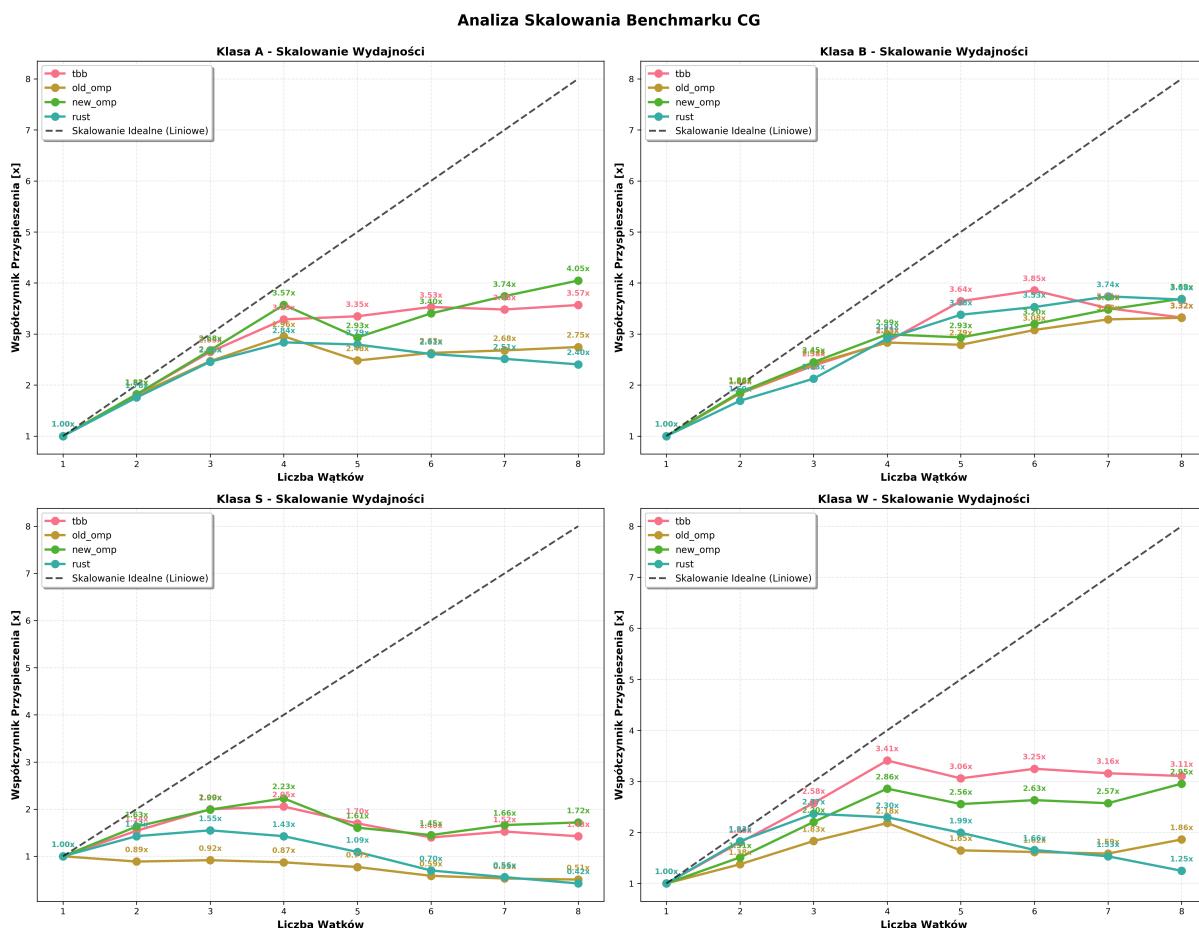
Klasa S

W przypadku klasy S wyraźnie widoczne są ograniczenia skalowania. tbb i old_omp osiągają szczytowe wartości przy 3-4 wątkach, po czym wydajność zaczyna spadać. tbb osiąga maksimum (4297 MFLOPS) przy 3 wątkach, natomiast old_omp przy 2 wątkach (3103 MFLOPS), z

wyraźnym trendem malejącym przy dalszym zwiększaniu liczby wątków. rust również notuje spadek po osiągnięciu maksimum (2509 MFLOPS), co może świadczyć o narzuceniu narzutu synchronizacji przy małym rozmiarze danych. new_omp wypada najsłabiej - spadek wydajności przy większej liczbie wątków sugeruje ograniczoną użyteczność dla tej klasy problemu.

Klasa W

Dla klasy W, ponownie najwyższe wartości osiąga tbb, z maksimum 8704 MFLOPS przy 4 wątkach i wysoką stabilnością w dalszych konfiguracjach. old_omp również prezentuje dobre wyniki, choć maksymalna wydajność (6224 MFLOPS) jest niższa niż w przypadku tbb. Rust osiąga przyzwoite wartości (5300 MFLOPS przy 8 wątkach), a new_omp pozostaje konsekwentnie najmniej wydajny (1200 MFLOPS przy 8 wątkach).



Rys. 9.5: Analiza skalowania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

Powyższy wykres - rysunek 9.5 przedstawia skalowanie wydajności benchmarku CG. Skalowanie wyróżnione zostało za pomocą współczynnika przyspieszenia względem wykonania jednowątkowego i odniesione do skalowania idealnego (liniowego).

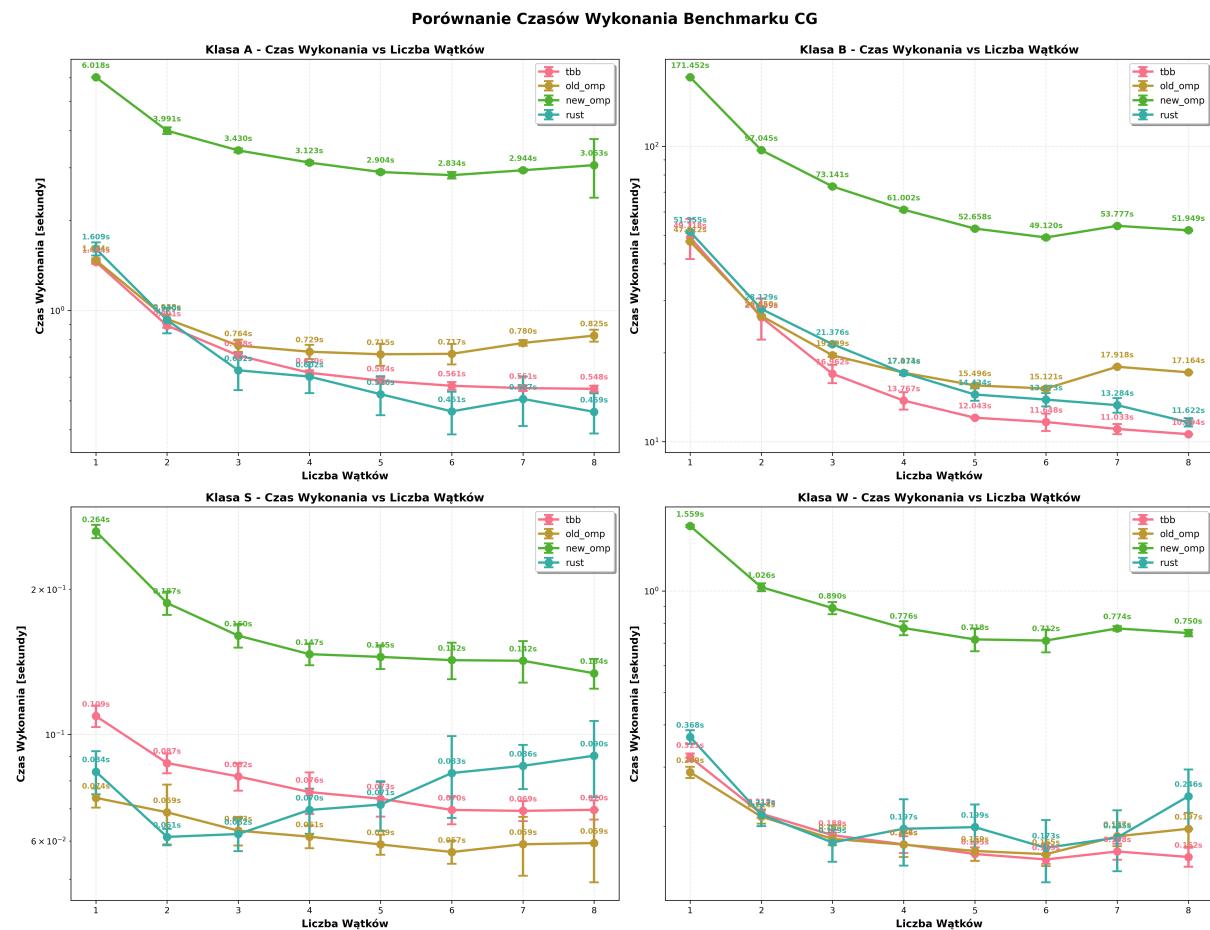
Analiza wykresów ujawnia wyraźne różnice w charakterystyce skalowalności pomiędzy implementacjami. W przypadku większych klas problemów (A, B, W) implementacje tbb oraz rust wykazują najbardziej efektywne skalowanie, osiągając współczynniki przyspieszenia przekraczające 3x przy 8 wątkach, z lokalnymi maksymami już przy 4-6 wątkach. Choć żaden z wariantów nie osiąga idealnego skalowania liniowego, to tbb zbliża się do tego poziomu najbliższej, szczególnie w klasach A i B.

Implementacja old_omp wykazuje umiarkowane skalowanie, a jej przyspieszenie rośnie wraz z liczbą wątków, jednak wolniej niż w przypadku tbb czy rust. Współczynniki przyspieszenia dla old_omp są stabilne, ale znacznie oddalone od linii idealnej, co może wskazywać na ograniczenia w zarządzaniu wątkami i efektywności synchronizacji.

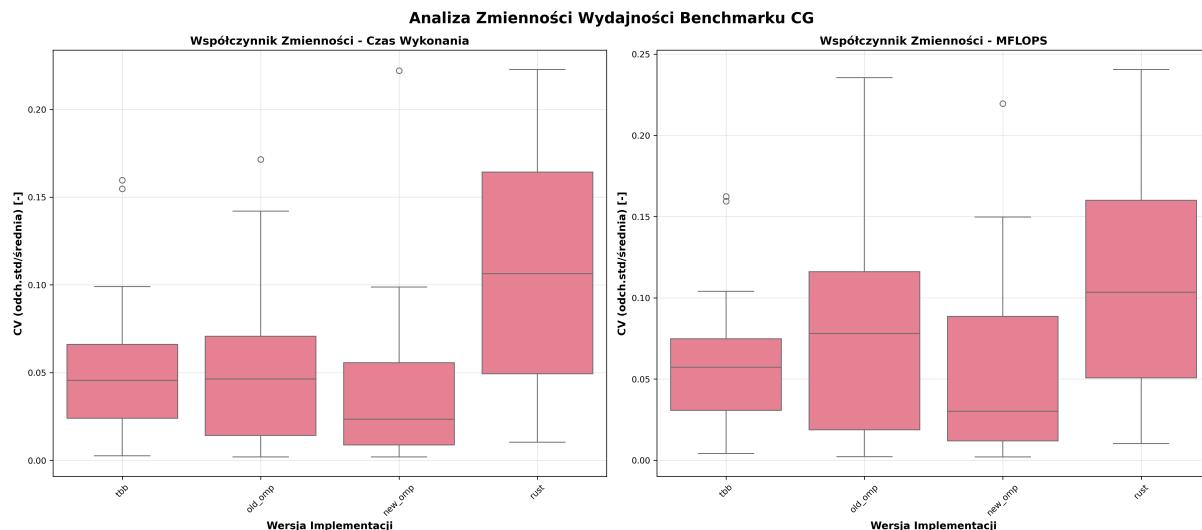
new_omp prezentuje wyraźnie najniższe wartości przyspieszenia we wszystkich klasach problemu. Współczynnik dla tej implementacji często osiąga maksimum przy 2-4 wątkach, po czym jego wzrost ulega zahamowaniu lub wręcz obserwowany jest spadek. Taki przebieg może świadczyć o niskiej efektywności skalowania wynikającej z narzutu synchronizacji, nieefektywnej dekompozycji zadań lub nieadekwatnego wykorzystania zasobów systemowych w przypadku większej liczby wątków.

Zwraca uwagę, że klasy problemu o większym rozmiarze (B i W) wykazują generalnie lepsze skalowanie niż klasy mniejsze (S), co jest zgodne z teoretycznym założeniem, że większy problem obliczeniowy lepiej amortyzuje koszty narzutów komunikacyjnych i synchronizacyjnych. W klasie S przyrost przyspieszenia jest niewielki lub wręcz ujemny dla niektórych implementacji, co wskazuje na zbyt małą ilość pracy do równomiernego rozproszenia pomiędzy rdzeniami procesora.

9.1.2. Wyniki benchmarków - platforma x86_64



Rys. 9.6: Porównanie czasów wykonania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie x86_64



Rys. 9.7: Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie x86_64

Wykresy - rysunek 9.6 przedstawiają czasy wykonania benchmarku CG dla czterech klas problemu (A, B, S, W) w zależności od liczby wątków, dla czterech implementacji równoległych: tbb, old_omp, new_omp i rust.

Implementacje TBB oraz new_omp wykazują istotne skrócenie czasu wykonania wraz ze wzrostem liczby wątków, zwłaszcza w przypadku klas A, B oraz W.

Z kolei old_omp charakteryzuje się umiarkowaną poprawą czasu wykonania; jednak w konfiguracjach z większą liczbą wątków, szczególnie dla klasy B, obserwuje się wyraźne pogorszenie wyników. Może to wskazywać na istotny narzut związany z synchronizacją lub nieefektywny podział pracy między wątki.

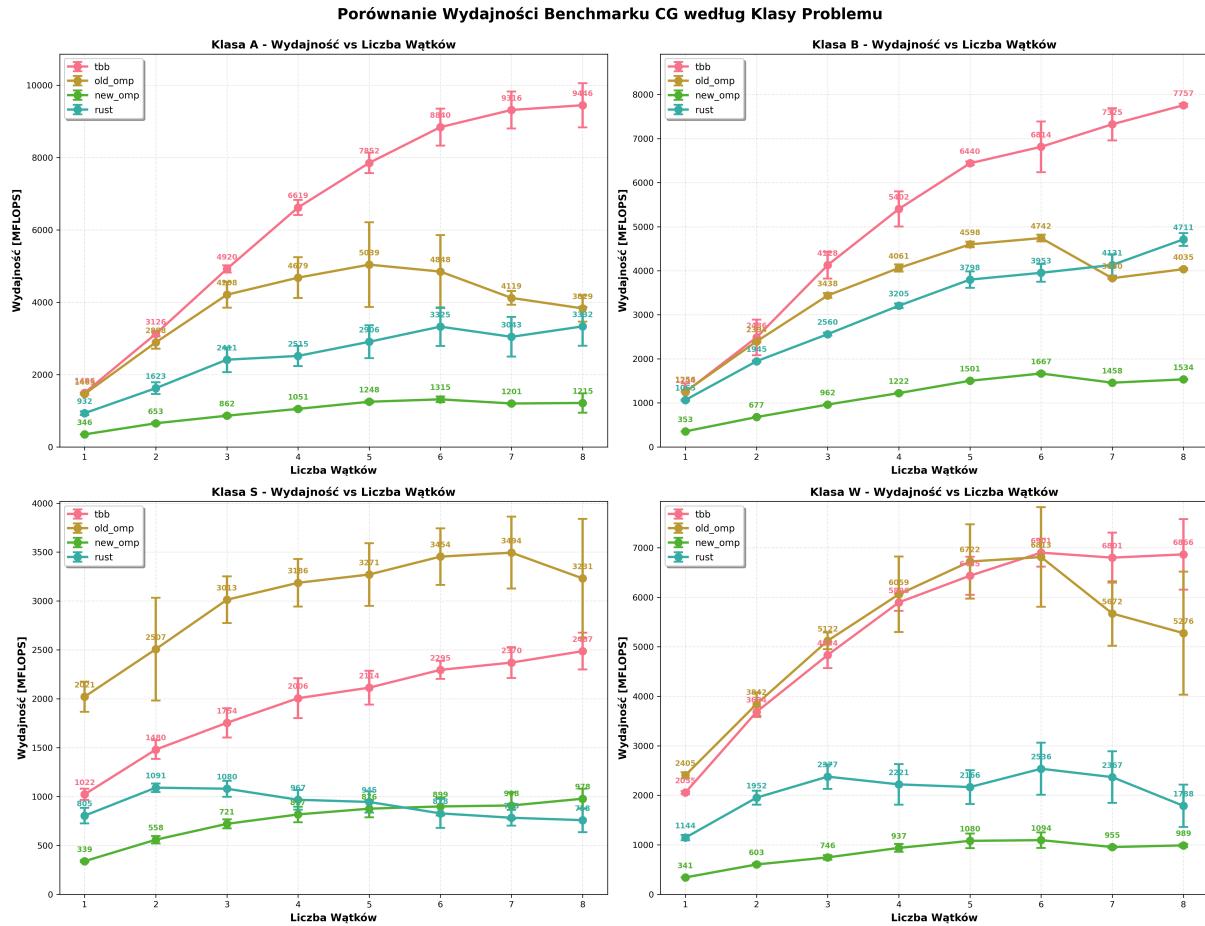
Implementacja w języku Rust, mimo że w niektórych przypadkach osiąga zadowalające rezultaty przy mniejszej liczbie wątków, traci tę przewagę w miarę zwiększania równoległości. Może to być konsekwencją ograniczeń w mechanizmach zarządzania wielowątkowością lub niedostosowanej strategii dekompozycji zadań.

W przypadku klasy S, reprezentującej niewielki problem obliczeniowy, wszystkie analizowane implementacje osiągają bardzo krótkie czasy wykonania. Wzrost liczby wątków przynosi w tym przypadku jedynie marginalne korzyści, a w niektórych przypadkach prowadzi wręcz do spadku wydajności, co można tłumaczyć narzutem wynikającym z równoleglenia w stosunku do niewielkiej skali problemu.

Z analizy rozkładu - rysunek 9.7 zmienności wynika, że implementacja new_omp cechuje się najwyższą zmiennością zarówno w zakresie czasu wykonania, jak i osiąganej wydajności (mniejszej w MFLOPS). Świadczy to o wysokim stopniu przewidywalności oraz deterministycznym charakterze działania tej wersji, mimo jej ogólnie niższej efektywności obliczeniowej.

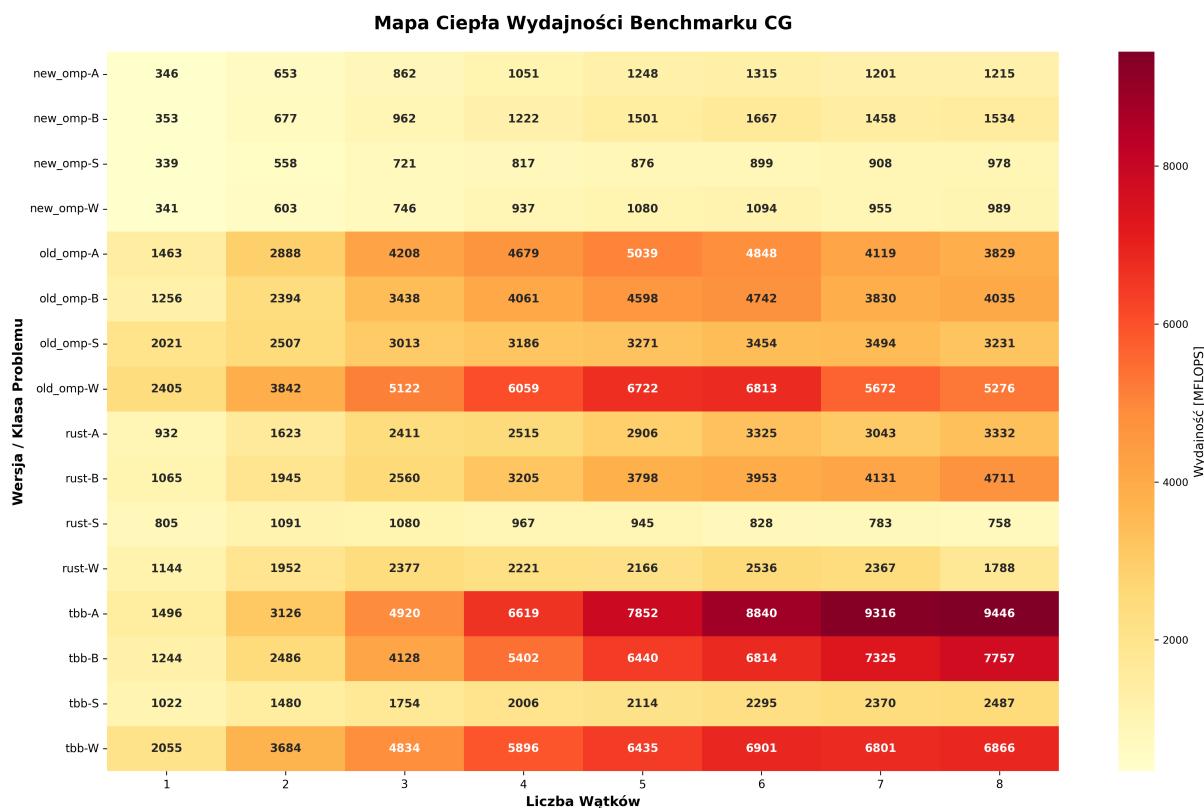
Implementacje TBB oraz old_omp wykazują umiarkowaną zmienność wyników. W ich przypadku zaobserwowano pojedyncze wartości odstające, szczególnie w przypadku TBB, co może wskazywać na niekonsystentne zachowanie w określonych warunkach wykonawczych, takich jak zwiększone obciążenie systemu lub interferencje z innymi procesami.

Z kolei implementacja w języku Rust, mimo że w wybranych przypadkach oferowała dobre rezultaty czasowe, charakteryzuje się najwyższą zmiennością spośród analizowanych rozwiązań. Wysoka wariancja obserwowana w różnych konfiguracjach eksperymentalnych może świadczyć o ograniczonej stabilności tej implementacji, bądź środowiska wykonawczego, w którym została uruchomiona.



Rys. 9.8: Porównanie wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

Na wykresach na rysunku 9.8 zaprezentowano porównanie wydajności benchmarku CG mierzonej w MFLOPS (milionach operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę). Wydajność została przedstawiona jako funkcja liczby wątków (1-8) dla czterech implementacji równoległych.



Rys. 9.9: Mapa ciepła wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

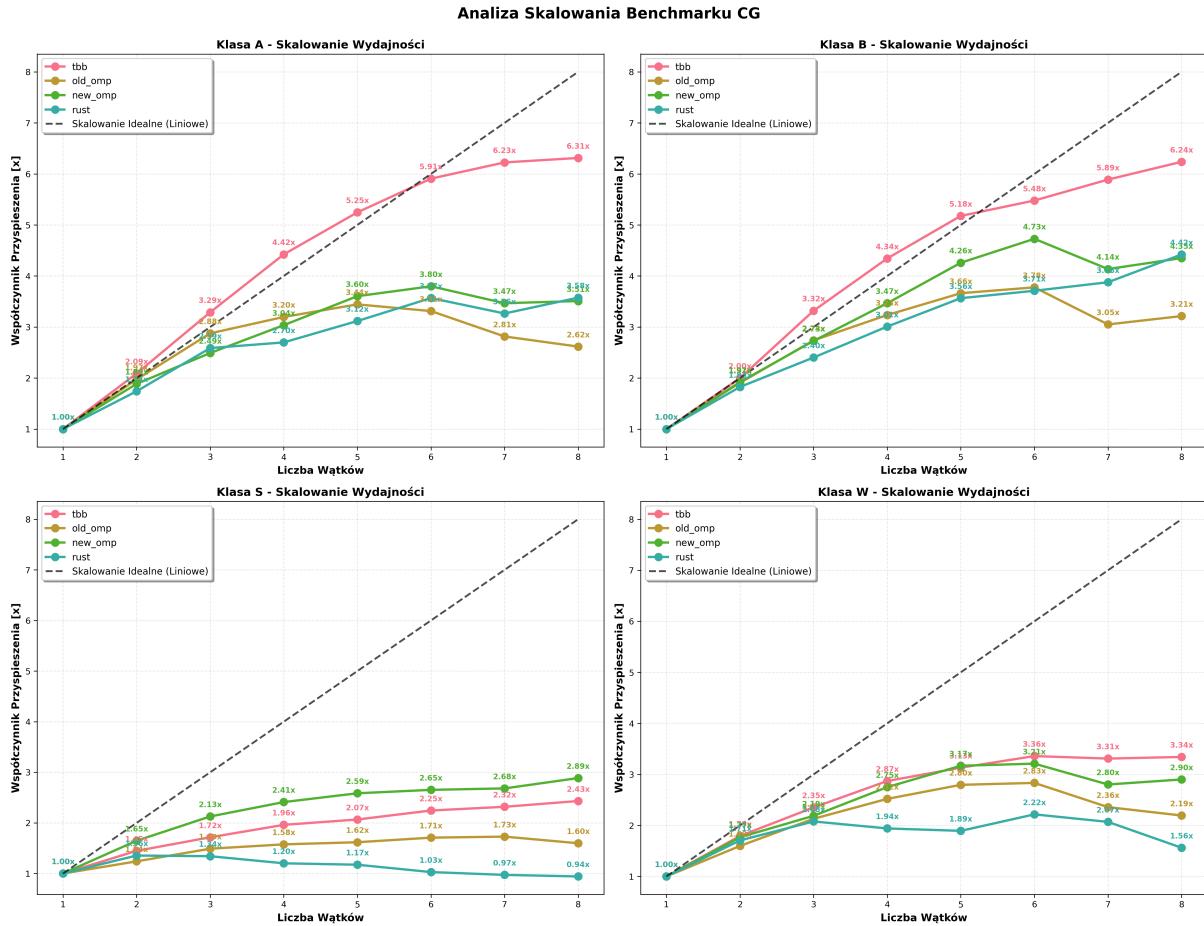
Powyższa mapa cieplna - rysunek 9.9 przedstawia wydajność (w MFLOPS). Wydajność została przedstawiona w zależności od liczby użytych wątków. Odcienie koloru od żółtego do ciemnoczerwonego wskazują na wzrost wydajności.

Implementacja tbb wyraźnie dominuje we wszystkich klasach problemu, wykazując największy przyrost wydajności wraz ze wzrostem liczby wątków. W klasie A osiąga wartość bliską 9500 MFLOPS przy 8 wątkach, a w klasie B niemal 7800 MFLOPS. Również w klasach W i S tbb prezentuje bardzo dobre rezultaty, konsekwentnie przewyższając pozostałe implementacje.

old_omp zajmuje drugą pozycję pod względem wydajności. Choć w klasach A i B nie osiąga wyników tbb, to w klasach W i S oferuje konkurencyjne rezultaty. W szczególności w klasie S przy mniejszej liczbie wątków (2-4) uzyskuje najwyższe wartości MFLOPS w porównaniu z pozostałymi implementacjami, co sugeruje jego efektywność dla mniejszych problemów obliczeniowych.

Rust wykazuje umiarkowaną wydajność, która rośnie do pewnego momentu (najczęściej przy 5-6 wątkach), po czym następuje stabilizacja lub nawet lekki spadek.

Najniższe wyniki uzyskuje new_omp, którego krzywe wzrostu MFLOPS są płaskie i znacznie oddalone od pozostałych implementacji. Nawet przy większej liczbie wątków nie obserwuje się znaczącej poprawy wydajności.



Rys. 9.10: Analiza skalowania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

Powyższy wykres - rysunek 9.10 przedstawia skalowanie wydajności benchmarku CG. Skalowanie wyróżnione zostało za pomocą współczynnika przyspieszenia względem wykonania jednowątkowego i odniesione do skalowania idealnego (liniowego).

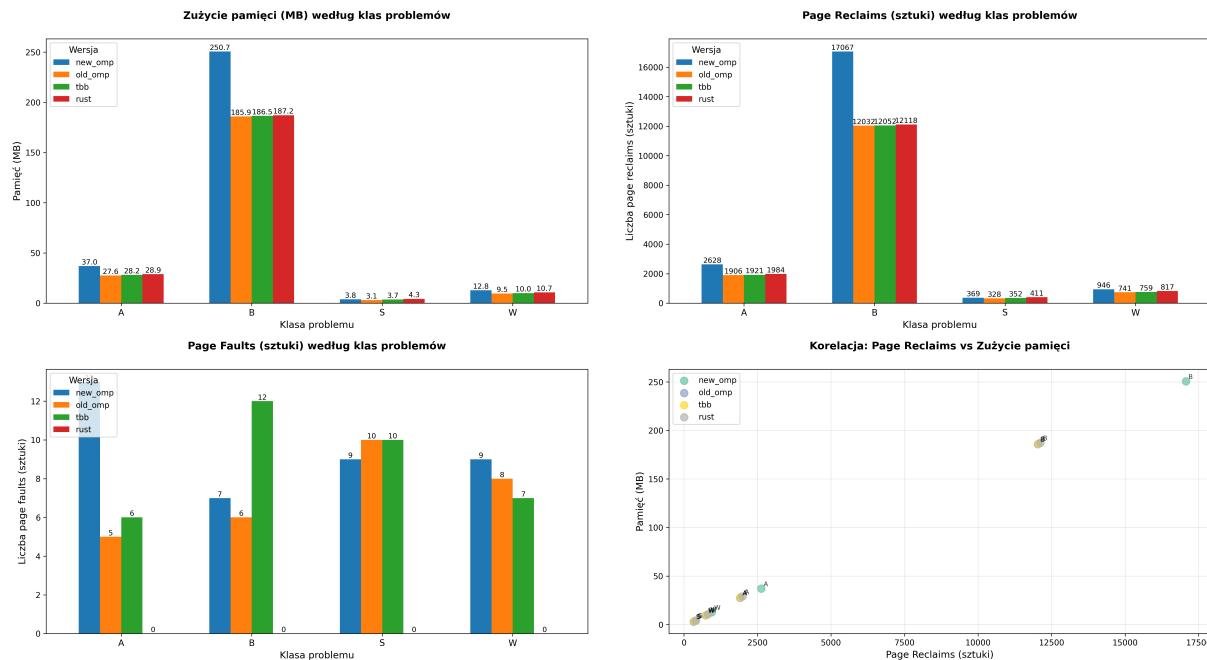
Implementacja TBB wykazuje najwyższy poziom skalowalności spośród wszystkich analizowanych rozwiązań. W klasach A, B oraz W osiąga przyspieszenie przekraczające 6x przy 8 wątkach, co stanowi wynik bliski idealnemu skalowaniu. Świadczy to o bardzo efektywnym wykorzystaniu dostępnych zasobów obliczeniowych w szerokim zakresie stopni równoległości.

Zaskakująco dobre wyniki skalowalności uzyskuje również new_omp, zwłaszcza w klasach A i B, gdzie przy 8 wątkach odnotowano przyspieszenie rzędu 4.1x-4.8x. Pomimo niższej bezwzględnej wydajności (MFLOPS), obserwowane skalowanie wskazuje na skuteczne rozproszenie obciążenia obliczeniowego w przypadku zadań o średniej i dużej skali.

Implementacja old_omp charakteryzuje się umiarkowanym wzrostem wydajności, który stosunkowo wcześnie ulega spowolnieniu. W klasach A i B efektywność skalowania zaczyna wyraźnie maleć po osiągnięciu 4-6 wątków, natomiast w klasie W wzrost wydajności powyżej 4 wątków jest marginalny.

Najsłabsze właściwości skalowalne prezentuje implementacja w języku Rust, szczególnie w klasach S i W. Już przy 4-6 wątkach obserwowana jest stagnacja, a nawet spadek współczynnika przyspieszenia.

9.1.3. Wyniki profilowania wydajności - platforma ARM64



Rys. 9.11: Profilowanie wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64

Zużycie pamięci (MB)

Na pierwszym wykresie - rysunek 9.11 (lewy górny róg) przedstawiono zużycie pamięci operacyjnej (w MB) dla czterech wersji implementacji algorytmu:

- W klasie problemu B występuje najwyższe zużycie pamięci we wszystkich wersjach. Szczególnie zauważalny jest wynik dla new_omp (250,7 MB), który znacznie przekracza wartości dla pozostałych wersji (około 185-187 MB).
- W klasie A new_omp również zużywa najwięcej pamięci (37 MB), natomiast pozostałe wersje wykazują zbliżony i niższy poziom zużycia (około 27-29 MB).
- W klasach S i W różnice są mniej wyraźne, jednak nadal new_omp wykazuje największe zużycie pamięci.
- Wersja rust generalnie charakteryzuje się najmniejszym lub jednym z najmniejszych zużyć pamięci w większości klas problemów.

Liczba zwalniania stron pamięci (sztuki)

Drugi wykres - rysunek 9.11 (prawy górny róg) ilustruje liczbę zwalniania stron pamięci (ang. *page reclaim*), czyli sytuacji, w których system operacyjny odzyskuje strony pamięci.

- Najwięcej zwalnianych stron pamięci występuje w klasie B dla wersji new_omp (17067), co koresponduje z jej wysokim zużyciem pamięci.
- W pozostałych wersjach liczba zwolnionych stron w klasie B jest znacznie niższa (około 12000-12100).
- W klasie A new_omp ponownie osiąga najwyższy wynik (2628), przy niższych wartościach pozostałych wersji (około 1900).
- W klasach S i W różnice są mniej zauważalne, choć new_omp nadal wykazuje wyższe wartości.

Odwołania do nieobecnych stron (sztuki)

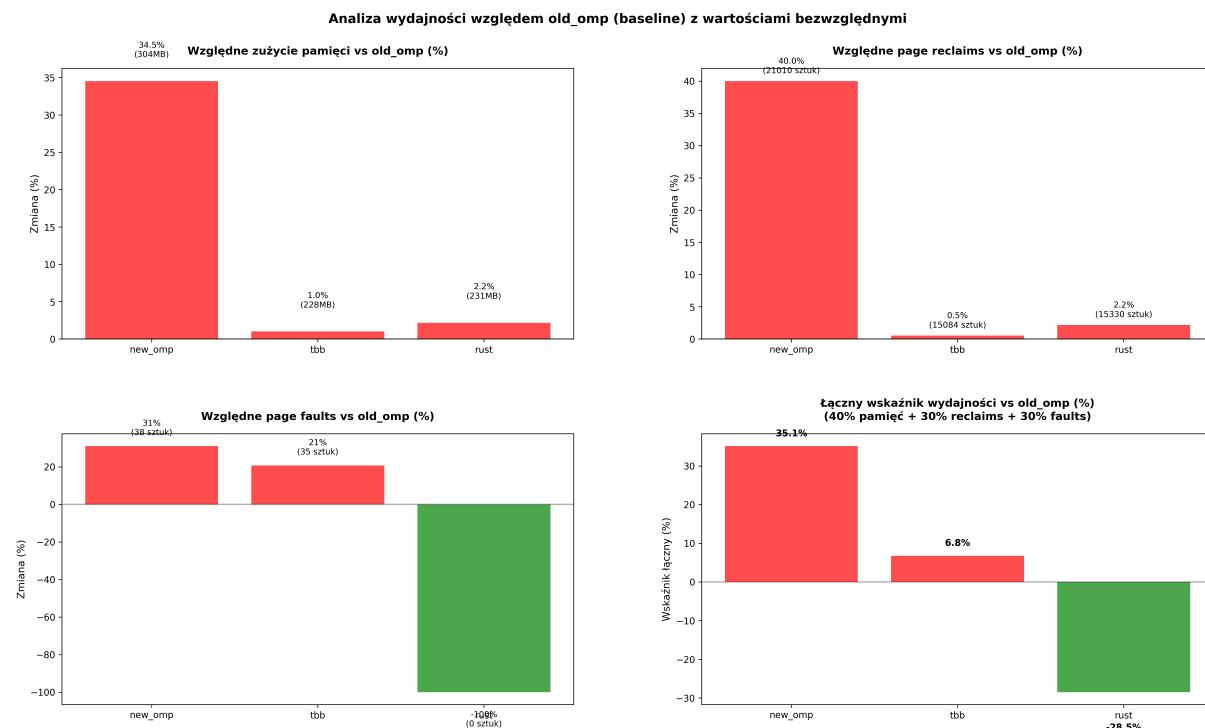
Trzeci wykres - rysunek 9.11 (lewy dolny róg) przedstawia odwołania do nieobecnych stron-liczbę (ang. *page fault*) - czyli sytuacji, w których wymagany fragment pamięci nie znajduje się aktualnie w RAM-ie.

- W klasie A new_omp wykazuje najwyższą liczbę page faults (13), zaś rust nie generuje żadnych błędów.
- W klasie B najwięcej błędów generuje TBB (12), podczas gdy rust ponownie nie wykazuje żadnych.
- W klasach S i W rust również nie generuje page faults, a inne wersje wykazują umiarkowane wartości (7-10).
- Wyniki te sugerują bardzo efektywną gospodarkę pamięciową w wersji rust.

Korelacja: Liczba zwalniania stron pamięci vs Zużycie pamięci

Ostatni wykres - rysunek 9.11 (prawy dolny róg) ilustruje zależność pomiędzy liczbą zwolnionych stron pamięci a zużyciem pamięci.

- Widoczna jest silna dodatnia korelacja - im większe zużycie pamięci, tym większa liczba zwolnionych stron pamięci. Najwyraźniejszym punktem odniesienia jest wersja new_omp dla klasy B, która dominuje pod względem obu metryk.
- Punkty reprezentujące wersję rust znajdują się w lewej dolnej części wykresu, wskazując na niskie zużycie pamięci i małą liczbę zwolnionych stron.



Rys. 9.12: Analiza wydajności względem old_omp (punkt odniesienia) z wartościami bezwzględnymi na platformie ARM64

Na wykresie - rysunek 9.12 szczegółowa analiza czterech wykresów przedstawiających wzającą wydajność trzech wersji implementacji (new_omp, TBB, rust) względem wersji bazowej old_omp. Analiza dotyczy zużycia pamięci, liczby zwolnionych stron pamięci, odwołań do nieobecnych stron oraz skumulowanego wskaźnika efektywności.

Względne zużycie pamięci vs old_omp

Pierwszy wykres - rysunek 9.12 (lewy górnny róg) ukazuje procentową zmianę w zużyciu pamięci operacyjnej względem implementacji referencyjnej. Największy wzrost odnotowano dla new_omp, gdzie zużycie pamięci wzrosło o 34,5%, co przekłada się na dodatkowe 304 MB. Zmiany dla TBB i rust były marginalne i wyniosły odpowiednio 1,0% (228 MB) oraz 2,2% (231 MB), co sugeruje ich większą efektywność w kontekście gospodarowania pamięcią.

Względne odzyskiwanie stron pamięci vs old_omp

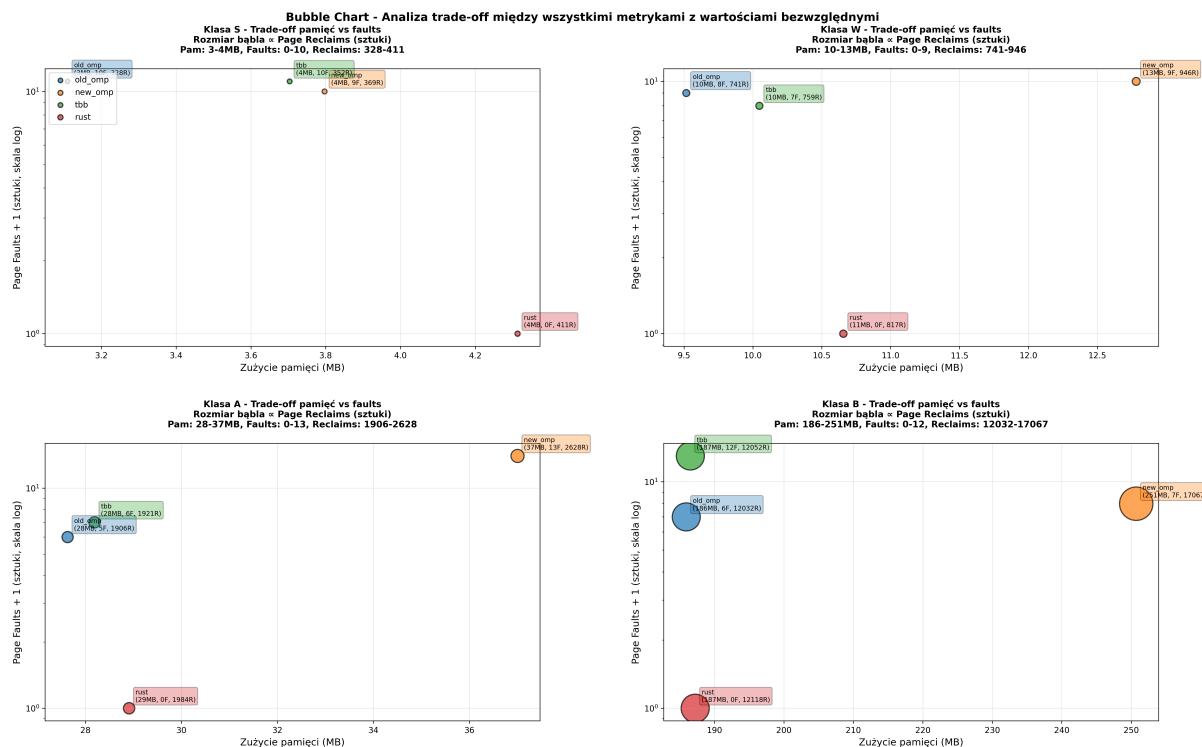
Drugi wykres - rysunek 9.12 (prawy górnny róg) przedstawia zmiany w liczbie odzyskanych stron pamięci. Implementacja new_omp wykazała aż 40% wzrost (21010 stron), co może świadczyć o intensywnym zarządzaniu pamięcią w trakcie wykonywania programu. Dla TBB i rust zmiany były minimalne (odpowiednio 0,5% i 2,2%), co może być interpretowane jako korzystny efekt optymalizacji dostępu do pamięci.

Względne błędy stron vs old_omp

Na trzecim wykresie - rysunek 9.12 (lewy dolny róg) obserwujemy względną liczbę błędów stron. new_omp i TBB odnotowały wzrost liczby błędów stron odpowiednio o 31% (38 sztuk) i 2% (35 sztuk), co może wskazywać na mniej wydajne wykorzystanie pamięci w porównaniu z old_omp. Z kolei rust jako jedyna implementacja odnotowała całkowitą eliminację błędów stron (-100%, 0 sztuk), co potwierdza wyjątkowo skuteczną kontrolę pamięci operacyjnej - mechanizmy własności oraz pożyczania.

Łączny wskaźnik wydajności vs old_omp

Na ostatnim wykresie - rysunek 9.12 (prawy dolny róg) przedstawiono zagregowany wskaźnik wydajności, będący ważoną sumą trzech poprzednich metryk: 40% udziału zużycia pamięci, 30% udziału odzyskiwania stron oraz 30% udziału błędów stron. Najwyższy wskaźnik (35,1%) ponownie osiąga new_omp, co oznacza wyraźnie wyższą konsumpcję zasobów w porównaniu do referencji. TBB wykazuje niewielki wzrost (6,8%), co czyni go względnie neutralnym względem old_omp. rust natomiast charakteryzuje się łącznym wskaźnikiem na poziomie -28,5%, co czyni go najbardziej efektywną implementacją w ujęciu ogólnym.



Rys. 9.13: Kompromisy (ang. *trade-off*) pomiędzy zużyciem pamięci a błędami stron pamięci, z uwzględnieniem liczby odzyskanych stron jako trzeciej zmiennej reprezentowanej przez rozmiar bąbla na platformie ARM64

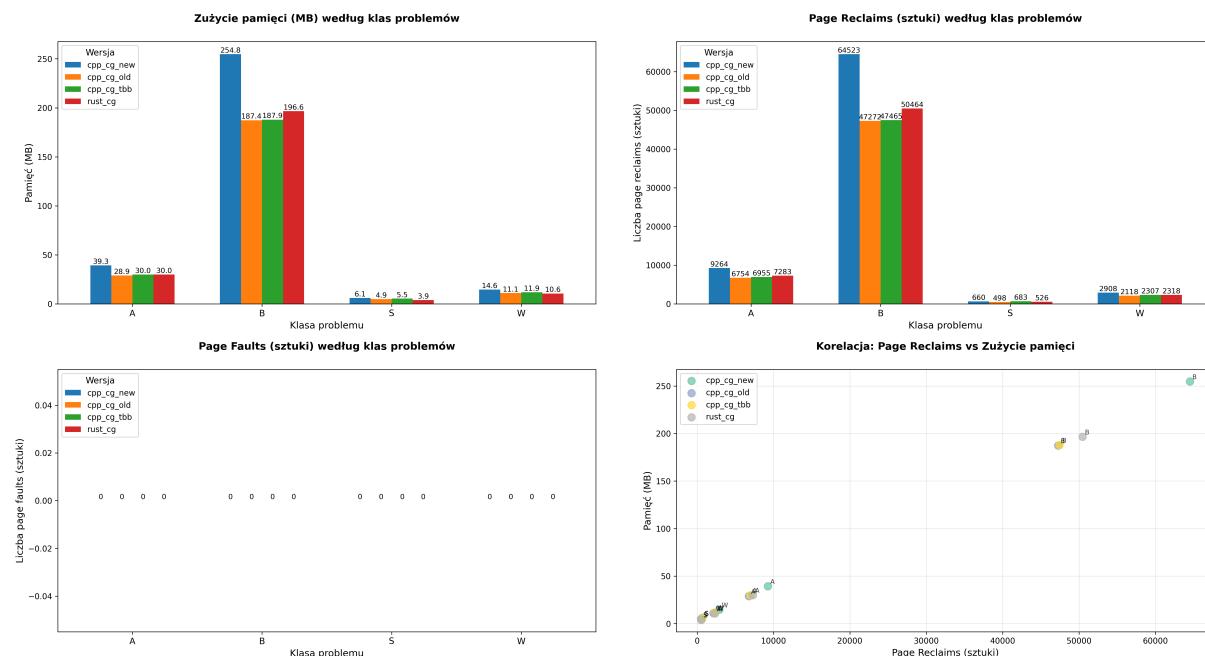
W celu całościowej oceny efektywności pamięciowej badanych implementacji, opracowano wykresy - rysunek 9.13 typu "bubble chart", które ukazują kompromisy między dwiema kluczowymi metrykami: zużyciem pamięci oraz liczbą błędów stron. Wykresy te wzbogacono o trzeci wymiar - liczbę odzyskanych stron pamięci, która została zakodowana poprzez rozmiar bąbla. Wszystkie wartości przedstawiono w postaci bezwzględnej, przy czym oś Y jest skalowana logarytmicznie w celu lepszego rozróżnienia niewielkich wartości.

Każdy z czterech wykresów odpowiada innej klasie obciążenia pamięciowego (S, W, A, B), przy czym wspólnym celem ich analizy jest uchwycenie relacji pomiędzy wzrostem zużycia pamięci i pogorszeniem lub poprawą stabilności działania (mierzonej błędami stron) oraz intensywnością operacji odzyskiwania stron.

W skali globalnej można zaobserwować, że implementacja rust wielokrotnie wypada korzystnie - cechuje się niskim zużyciem pamięci, zerową liczbą błędów stron w wielu przypadkach oraz stosunkowo niską liczbą zwolnień, co sugeruje wysoką efektywność i dobrą kontrolę nad zarządzaniem pamięcią. Z kolei new_omp, mimo czasem lepszych wyników obliczeniowych, wykazuje największe zużycie pamięci oraz relatywnie wysoką liczbę błędów stron i odzysków pamięci, co może oznaczać znaczną presję na system zarządzania pamięcią operacyjną.

Implementacja TBB prezentuje wyniki pośrednie, w niektórych przypadkach zbliżone do old_omp, ale przy lepszym wykorzystaniu zasobów - co czyni ją kompromisowym rozwiązaniem o umiarkowanej efektywności. -

9.1.4. Wyniki profilowania wydajności - platforma x86_64



Rys. 9.14: Profilowanie wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie x86_64

Zużycie pamięci (MB)

Z wykresu - rysunek 9.6 zużycia pamięci wynika, że implementacja new_omp jest zdecydowanie najbardziej pamięciożerna w klasie B, gdzie osiąga wartość 254,8 MB — to istotnie więcej niż pozostałe implementacje, które utrzymują się w zakresie 187-197 MB. Dla pozostałych klas (A, S, W) różnice pomiędzy implementacjami są znikome i mieszczą się w przedziale od 3,9 MB do 39,3 MB.

Zależność zużycia pamięci od klasy problemu jest zgodna z oczekiwaniemi: większa klasa (większy problem obliczeniowy) wiąże się z wyższym zużyciem zasobów. Jednak istotna różnica dla new_omp w klasie B sugeruje potencjalne niedoskonałości w zarządzaniu pamięcią lub większy narzut alokacyjny tej wersji.

Operacje Page Reclaim (sztuki)

Podobnie jak w przypadku zużycia pamięci, new_omp generuje najwyższe liczby operacji zwolnień stron — w klasie B sięgają one ponad 64 tys. Operacje te wskazują na intensywną aktywność zarządzania pamięcią przez system operacyjny i mogą prowadzić do pogorszenia wydajności w warunkach ograniczonych zasobów. Pozostałe implementacje generują wyraźnie mniej takich operacji (ok. 47-50 tys. dla klasy B).

W klasach A, S i W różnice między implementacjami są mniej znaczące. Warto jednak zwrócić uwagę, że rust we wszystkich klasach cechuje się stosunkowo niskim poziomem zwolnień, co może świadczyć o bardziej efektywnym wykorzystaniu pamięci przez alokator w środowisku Rust.

Page Faults (sztuki)

Wszystkie implementacje, niezależnie od klasy problemu, wykazują zerowy poziom błędów stron. Taki wynik jest pozytywny i świadczy o prawidłowej alokacji oraz dostępie do pamięci bez

potrzeby kosztownego przenoszenia stron pamięci z dysku do RAM-u. To również sugeruje, że żadne z testów nie spowodowały przeciążenia systemu w zakresie dostępnej pamięci fizycznej.

Korelacja: Liczba zwalniania stron pamięci vs Zużycie pamięci

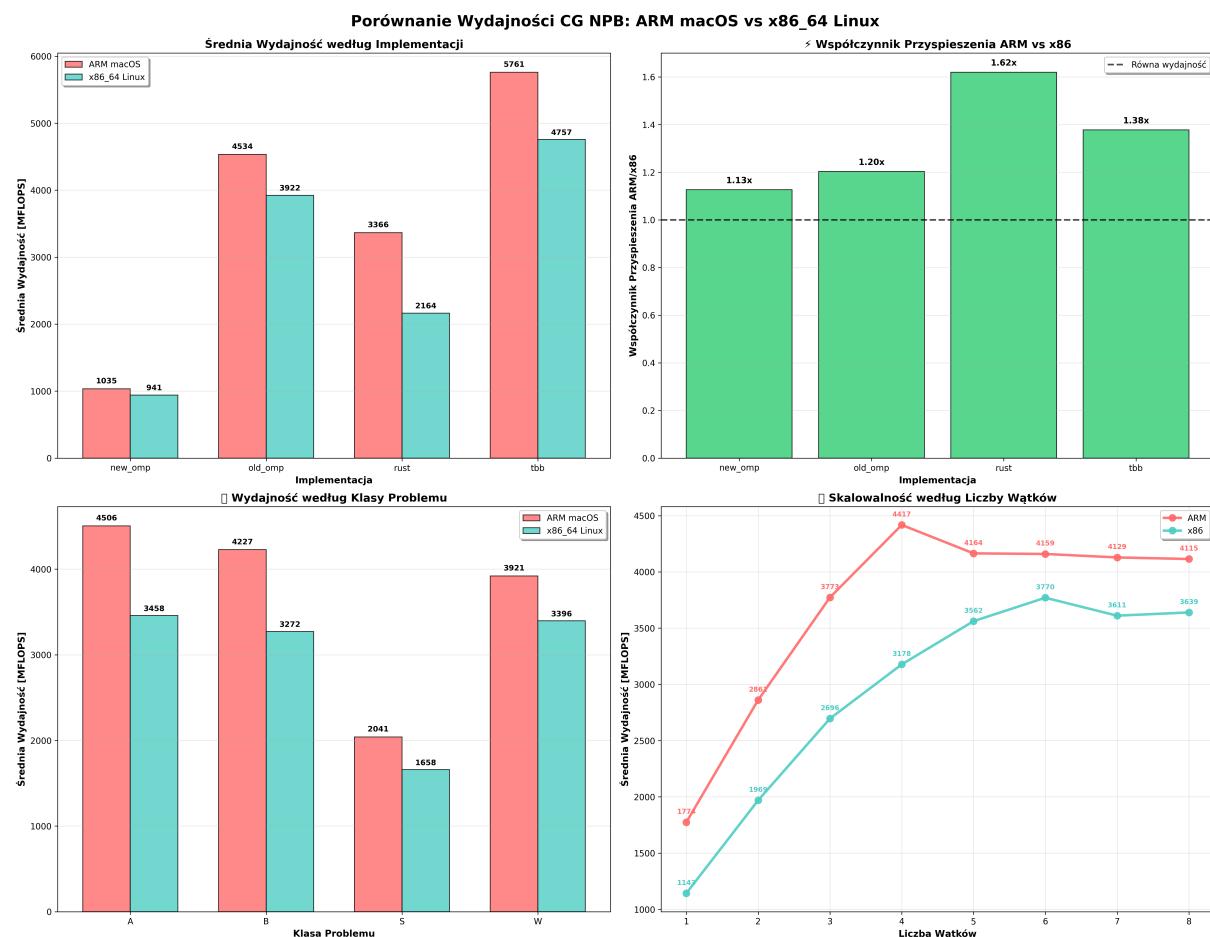
Wykres rozrzutu przedstawia silną dodatnią korelację pomiędzy liczbą operacji zwolnień stron a zużyciem pamięci. Punkty odpowiadające klasie B znajdują się wyraźnie w prawym górnym rogu wykresu, potwierdzając, że najbardziej zasobozerna klasa problemu generuje również najwięcej interakcji z systemowym menedżerem pamięci. Punkty dla klas A, S i W rozmieszczone są blisko siebie w lewym dolnym obszarze, co wskazuje na relatywnie stabilne i niskie zużycie pamięci.

Nota wyjaśniająca

Ze względu na brak błędów stron nie zamieszczono pozostałych wykresów, które byłyby oparte na tej metryce. Wykresy te nie miałyby sensu, ponieważ brak błędów stron oznacza, że wszystkie operacje pamięciowe były realizowane w ramach dostępnej pamięci fizycznej bez konieczności angażowania mechanizmów swapowania lub przenoszenia stron z dysku.

9.1.5. Porównanie pomiędzy platformami

Średnia wydajność i współczynnik przyspieszenia



Rys. 9.15: Porównanie średniej wydajności benchmarku CG dla platform ARM64 i x86_64

Na podstawie wykresów - rysunek 9.15 uśrednionej wydajności (wyrażonej w MFLOPS) można zaobserwować, że implementacje benchmarku CG uzyskują zróżnicowane rezultaty na obu platformach. Najwyższą wydajność osiąga implementacja tbb na obu architekturach, przy czym wynik dla ARM (5761 MFLOPS) jest wyższy niż dla x86 (4757 MFLOPS). Implementacja rust również wypada lepiej na platformie ARM, uzyskując przewagę nad x86 rzędu 62% (współczynnik przyspieszenia ARM/x86 = 1.62).

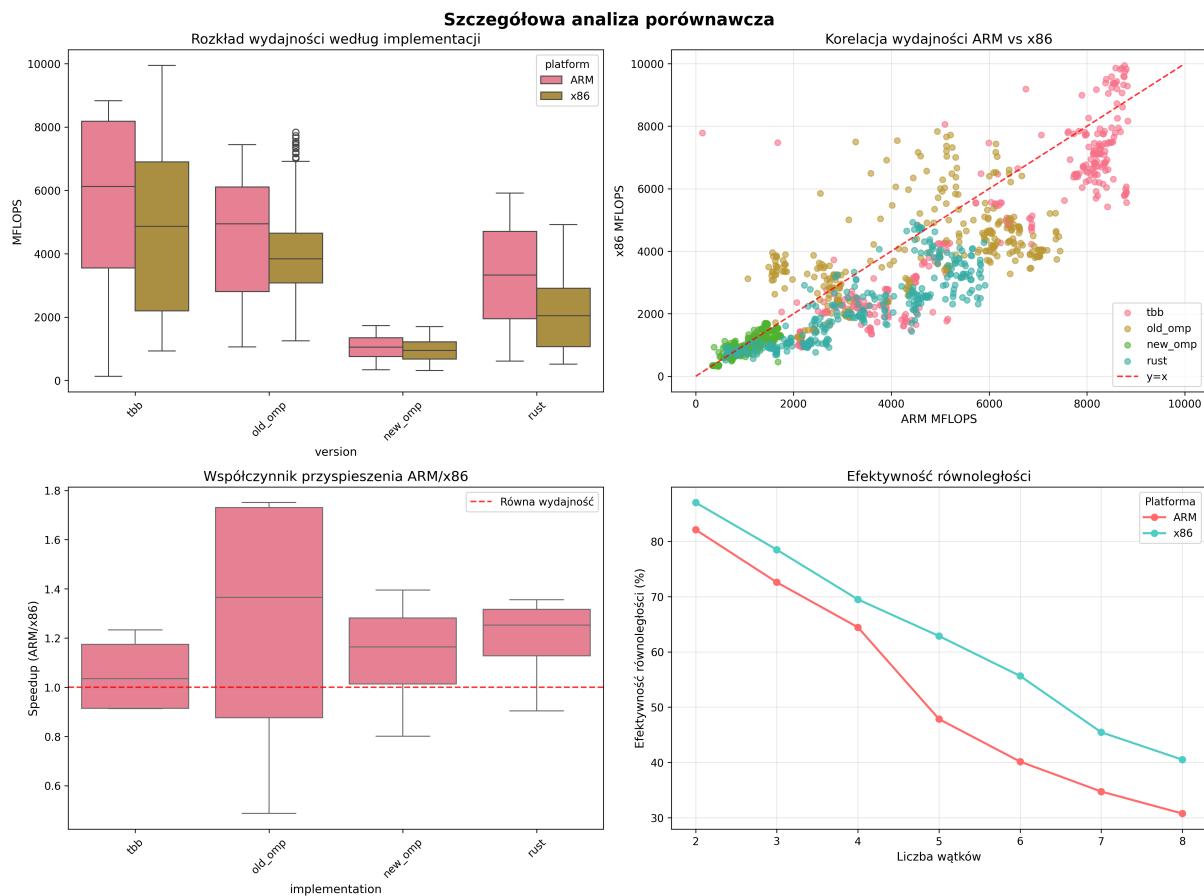
Z kolei old_omp i new_omp wykazują mniejsze różnice pomiędzy platformami, jednak nadal na korzyść ARM (współczynnik przyspieszenia odpowiednio 1.20 i 1.13). Pokazuje to, że układy ARM, mimo mniejszej popularności w obliczeniach naukowych, mogą zapewniać porównywalną lub wyższą wydajność w zadaniach równoległych.

Wydajność względem klasy problemu

Dla wszystkich klas problemu platforma ARM uzyskuje wyższe wartości MFLOPS w porównaniu do x86, przy czym różnice te są szczególnie widoczne w klasach A i B — odpowiednio 4506 vs 3458 oraz 4227 vs 3272 MFLOPS. Mniejsze różnice występują w klasach S i W, co może być związane z ograniczoną skalowalnością w mniejszych problemach oraz różnicami w architekturze pamięci podręcznej.

Skalowanie według liczby wątków

Analiza wykresu skalowalności pokazuje, że ARM osiąga wyższe wartości MFLOPS w niemal każdej konfiguracji wątkowej. Dla 4 wątków uzyskuje wartość 4417 MFLOPS, przewyższając tym samym x86 (3179 MFLOPS). Mimo że przy wzroście liczby wątków następuje spłaszczenie wykresów dla obu platform, ARM utrzymuje przewagę aż do 8 wątków, co potwierdza dobre skalowanie procesora ARM w tej klasie obliczeń.



Rys. 9.16: Szczegółowa analiza wydajności benchmarku CG dla platform ARM64 i x86_64

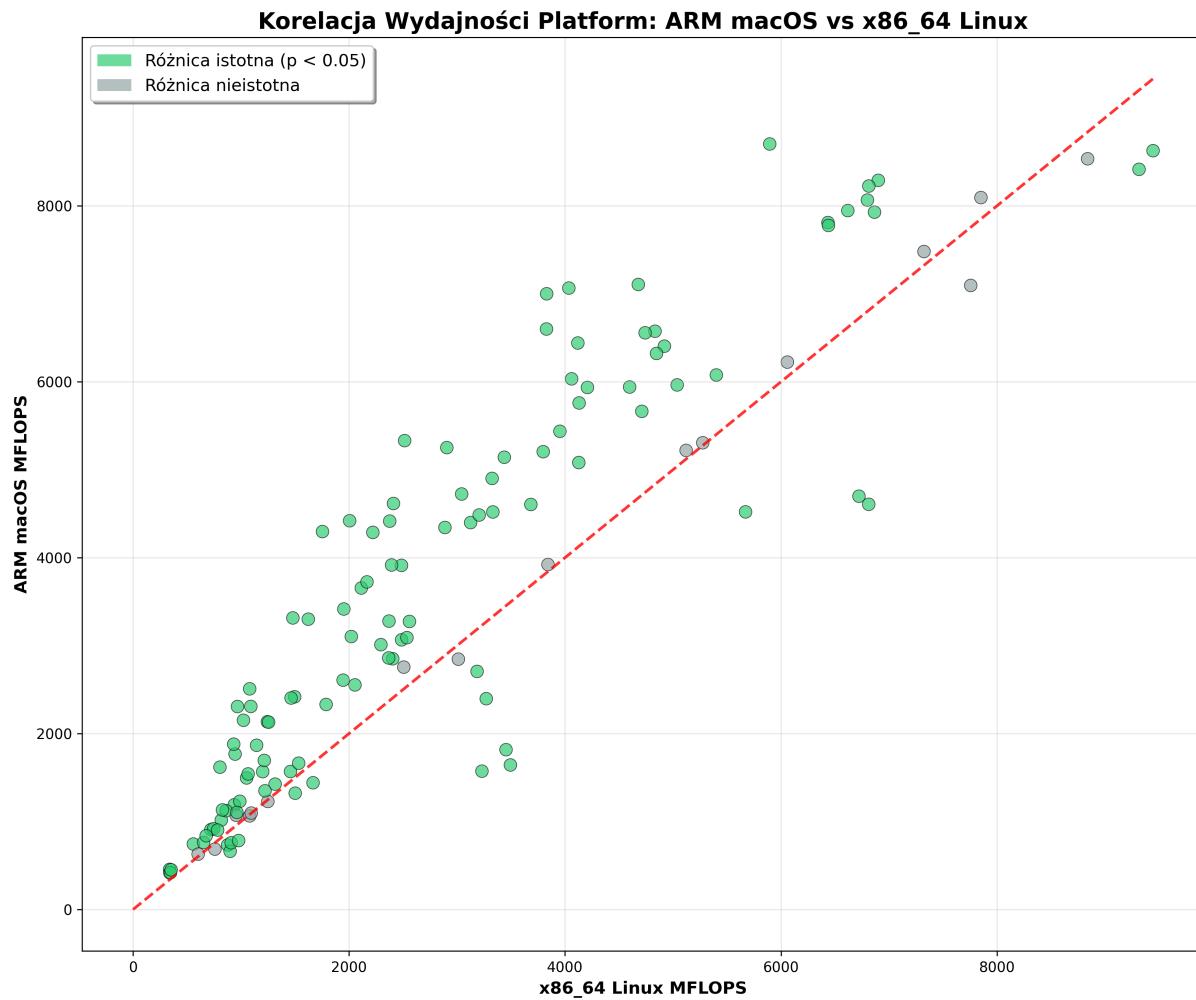
Rozkład wydajności i korelacja

Wykres pudełkowy obrazujące rozkład wydajności według implementacji pokazują większą zmienność wyników na platformie ARM, szczególnie dla tbb i old_omp, co może świadczyć o bardziej dynamicznym zarządzaniu zasobami na poziomie systemowym (macOS). Mimo tej zmienności, wartości median są konsekwentnie wyższe dla ARM.

Wykres koreacyjny MFLOPS ARM vs x86 ukazuje silną dodatnią korelację między wynikami na obu platformach, z większością punktów powyżej linii równej wydajności ($y = x$), co oznacza, że ARM zazwyczaj przewyższa x86 pod względem osiągów. W przypadku rust różnica jest szczególnie wyraźna.

Efektywność równoległości

Analiza efektywności równoległości (rozumianej jako stosunek osiągniętej wydajności do liczby wątków względem wydajności jednordzeniowej) wskazuje na wyraźnie wyższe wartości dla platformy x86 przywiększej liczbie wątków. Podczas gdy ARM charakteryzuje się dobrą wydajnością bezwzględną, jego efektywność maleje szybciej wraz ze wzrostem liczby wątków, co może wynikać z wąskiego gardła na poziomie pamięci współdzielonej lub mniejszej liczby jednostek wykonawczych na wątek fizyczny.

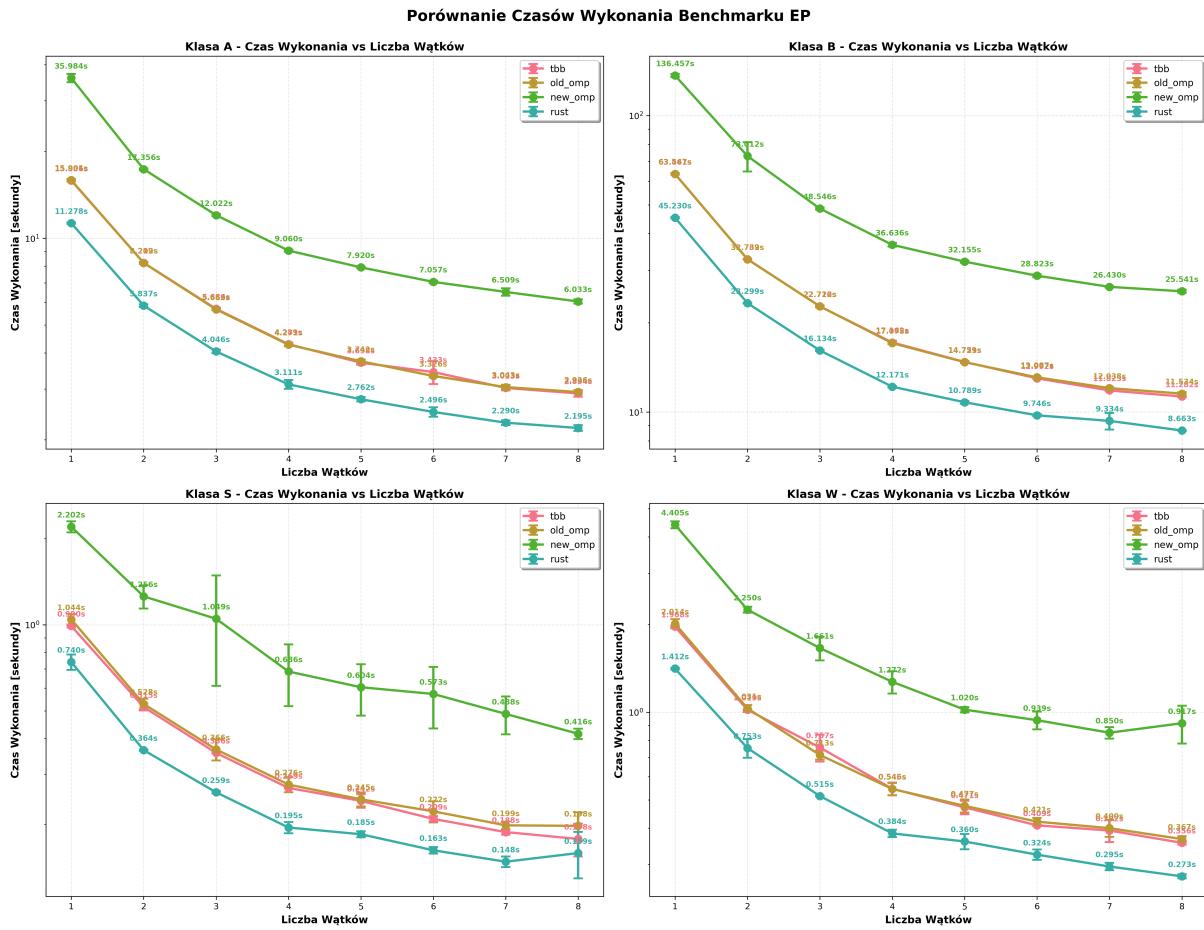


Rys. 9.17: Analiza istotności statystycznej benchmarku CG dla platform ARM64 i x86_64

Na wykresie - rysunek 9.17 zaprezentowano korelację wydajności z uwzględnieniem istotności statystycznej ($p < 0.05$). Zdecydowana większość punktów (zielone oznaczenia) wskazuje na istotne różnice wydajności między platformami. Dla kilku przypadków (oznaczenia szare) różnica nie była statystycznie znacząca. Potwierdza to tezę, że platforma ARM macOS w większości przypadków przewyższa x86_64 Linux, nie tylko nominalnie, ale również z punktu widzenia statystycznej wiarygodności wyników.

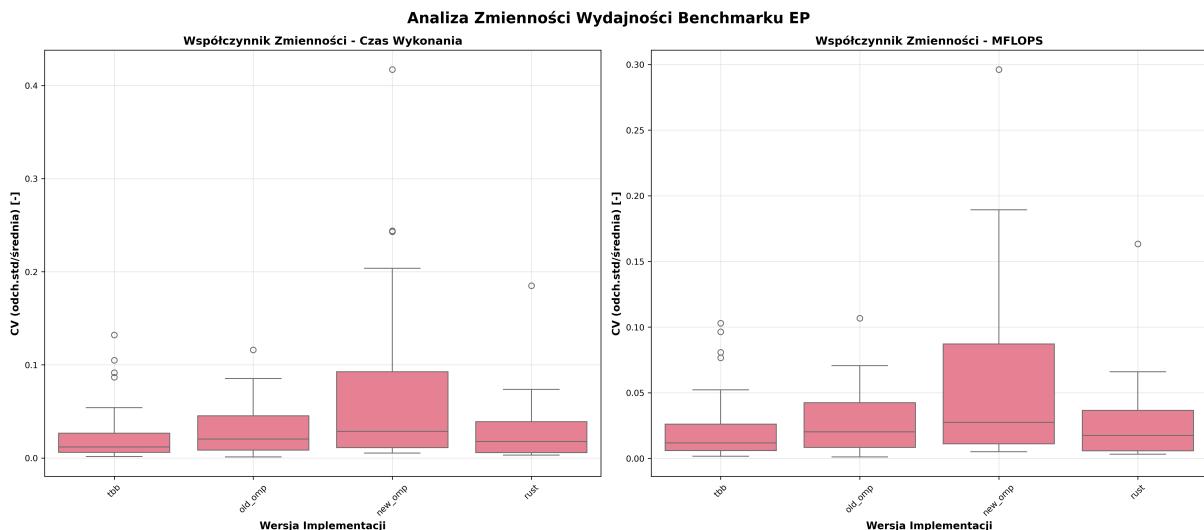
9.2. Benchmark EP

9.2.1. Wyniki benchmarków - platforma ARM64



Rys. 9.18: Porównanie czasów wykonania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Na rysunku 9.18 zaprezentowano zestawienie czasów wykonania benchmarku EP dla czterech klas problemu: S, W, A oraz B, przy użyciu czterech różnych implementacji równoległości: TBB, OpenMP w wersji oryginalnej w stylu języka Fortran (old_omp), OpenMP w wersji nowszej (new_omp) oraz implementacji w języku Rust. Dla każdej z klas przedstawiono zależność czasu wykonania od liczby wątków (od 1 do 8). Wartości zostały zaprezentowane w skali logarytmicznej.



Rys. 9.19: Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Najlepsze rezultaty czasowe, niezależnie od klasy problemu, osiąga implementacja z użyciem biblioteki Rust, co może świadczyć o wysokiej wydajności systemu wykonawczego tej technologii oraz efektywnej optymalizacji niskopoziomowej. Rust wykazuje też największą stabilność czasową przy wzroście liczby wątków, co może sugerować niskie koszty zarządzania wątkami.

Zarówno old_omp, jak i biblioteka TBB wykazują porównywalną wydajność w większości przypadków, przy czym TBB w klasach mniejszych (S, W) może osiągać nieco lepsze rezultaty, podczas gdy w klasach większych (A, B) ich wyniki się zbliżają. new_omp cechuje się natomiast najgorszą skalowalnością i najdłuższymi czasami wykonania, co może wskazywać na mniej efektywną implementację zarządzania zadaniami równoległymi lub wyższy narzut synchronizacji.

W przypadku klasy B, ze względu na większą złożoność obliczeniową, czasy wykonania są znacznie dłuższe, a różnice pomiędzy bibliotekami bardziej wyraźne. Zastosowanie skali logarytmicznej w tej klasie dodatkowo uwypukla przewagę rozwiązań o lepszej skalowalności. Warto również zauważyć, że dla większej liczby wątków (6-8) część implementacji przestaje zyskiwać znacząco na wydajności.

Zmienność czasu wykonania

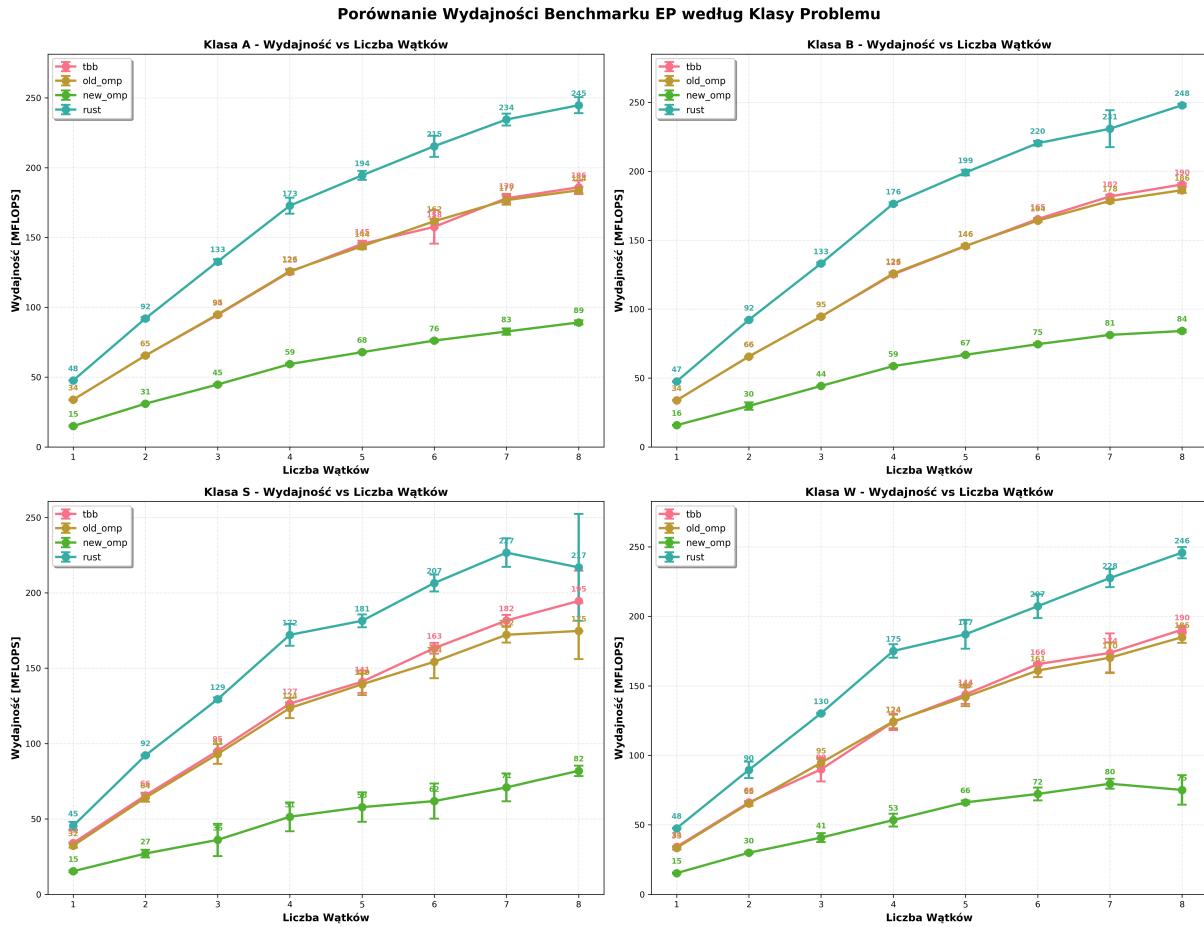
Na podstawie lewego wykresu - rysunek 9.19 można zauważyć, że najniższą zmiennością czasów wykonania charakteryzują się implementacje oparte na bibliotekach TBB oraz Rust, co świadczy o ich dużej powtarzalności i deterministycznym charakterze działania. Mediany współczynnika zmienności dla tych implementacji pozostają na bardzo niskim poziomie, a obserwowane wartości odstające są rzadkie i relatywnie niewielkie.

Oryginalna wersja OpenMP również wykazuje dobrą stabilność, choć z nieco większą rozpiętością wyników niż TBB i Rust. Natomiast nowa wersja OpenMP prezentuje największą zmienność. Występowanie licznych wartości odstających oraz szeroki rozrzut wyników podkreśla potencjalną niestabilność tej wersji w testowanych warunkach.

Zmienność MFLOPS

Podobne zależności można zaobserwować na prawym wykresie - rysunek 9.19, przedstawiającym zmienność wartości MFLOPS. Tutaj również TBB oraz Rust wyróżniają się najmniej-

szymi wartościami współczynnika zmienności, co potwierdza ich przewidywalność pod względem wydajności obliczeniowej. OpenMP w starszej wersji (old_omp) cechuje się umiarkowaną zmiennością, natomiast nowa wersja OpenMP (new_omp) ponownie odznacza się największą rozpiętością oraz medianą współczynnika zmienności, co może mieć negatywne implikacje dla zastosowań wymagających stabilnej wydajności.



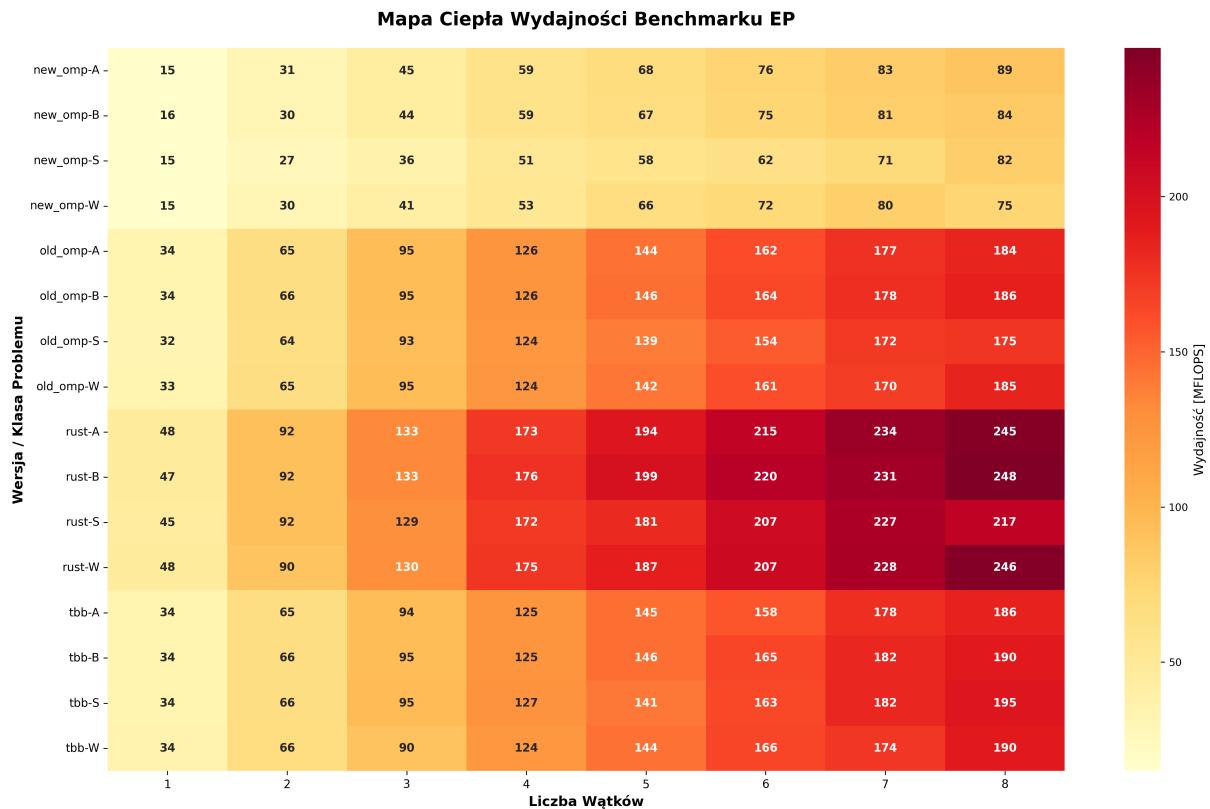
Rys. 9.20: Porównanie wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Na wykresach na rysunku 9.20 zaprezentowano porównanie wydajności benchmarku EP mierzonej w MFLOPS (milionach operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę). Wydajność została przedstawiona jako funkcja liczby wątków (1-8) dla czterech implementacji równoległych.

Implementacja w języku Rust konsekwentnie osiąga najwyższe wartości MFLOPS we wszystkich klasach problemu i dla każdej liczby wątków, co świadczy o bardzo efektywnym zarządzaniu równoległością oraz niskim narzucie wykonawczym. Warto również zauważyć, że Rust uzyskuje szczególnie imponujące wyniki dla większej liczby wątków (6-8), gdzie inne implementacje wykazują tendencję do spowolnienia przyrostu wydajności.

Zarówno biblioteka TBB, jak i starsza wersja OpenMP osiągają zbliżoną wydajność i dobrą skalowalność. W większości przypadków wartości MFLOPS dla tych dwóch rozwiązań są porównywalne, przy czym TBB niekiedy uzyskuje nieco lepsze rezultaty, szczególnie dla klas S i W.

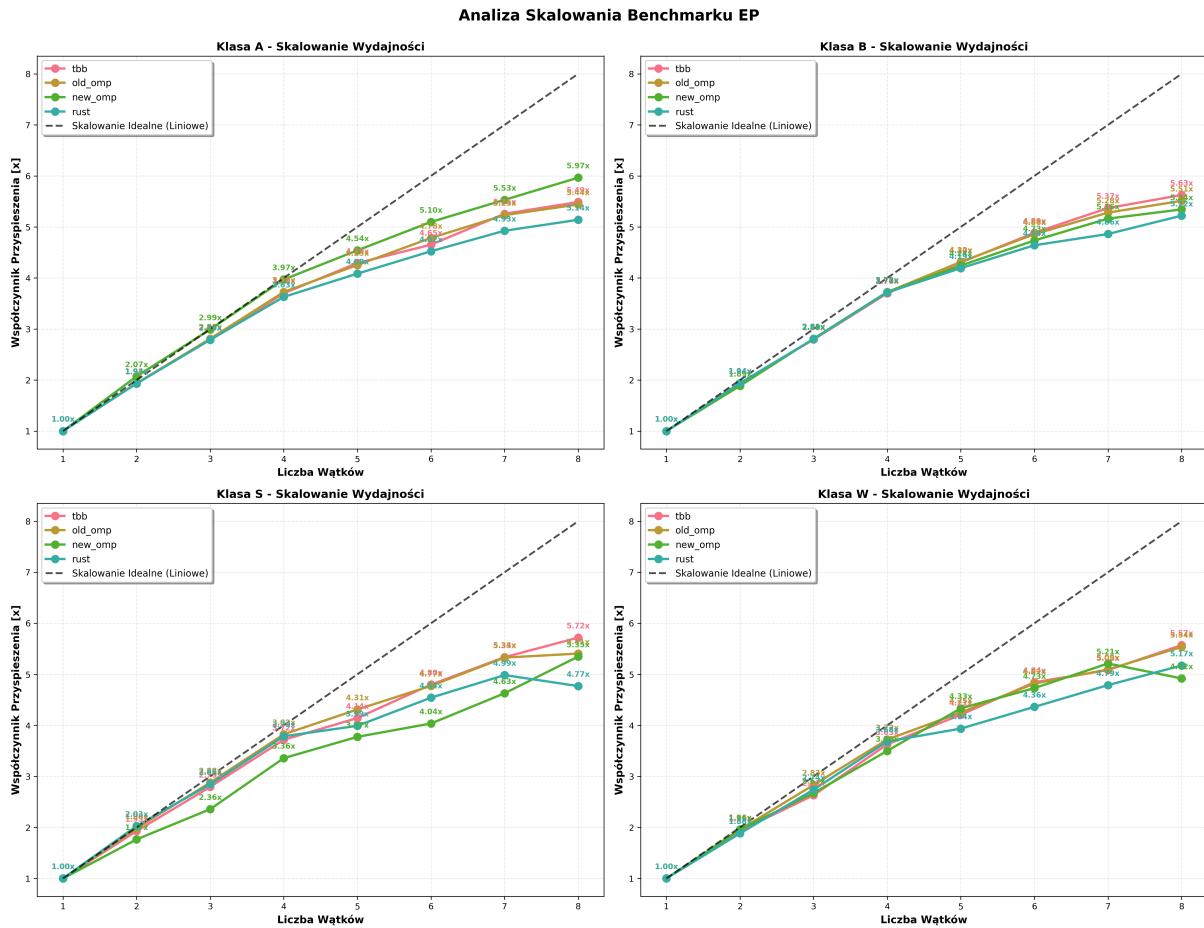
Z kolei implementacja oparta na nowej wersji OpenMP wykazuje wyraźnie niższą wydajność w porównaniu z pozostałymi rozwiązaniami. Różnice te są szczególnie widoczne przy większej liczbie wątków, gdzie wzrost MFLOPS jest bardziej spłaszczyony, co może wskazywać na ograniczenia w mechanizmach planowania zadań lub zwiększonego narzutu synchronizacji.



Rys. 9.21: Mapa ciepła wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Powyższa mapa cieplna - rysunek 9.21 przedstawia wydajność (w MFLOPS). Wydajność została przedstawiona w zależności od liczby użytych wątków. Odcienie koloru od żółtego do ciemnoczerwonego wskazują na wzrost wydajności.

Mapa ciepła jednoznacznie potwierdza przewagę implementacji Rust w każdym układzie: dla wszystkich klas problemu i liczby wątków. Wartości MFLOPS przekraczające 240 dla 8 wątków (np. 248 MFLOPS dla klasy B) są wyraźnie wyższe od wyników pozostałych bibliotek, w których wartości maksymalne oscylują w okolicach 185-195 MFLOPS.



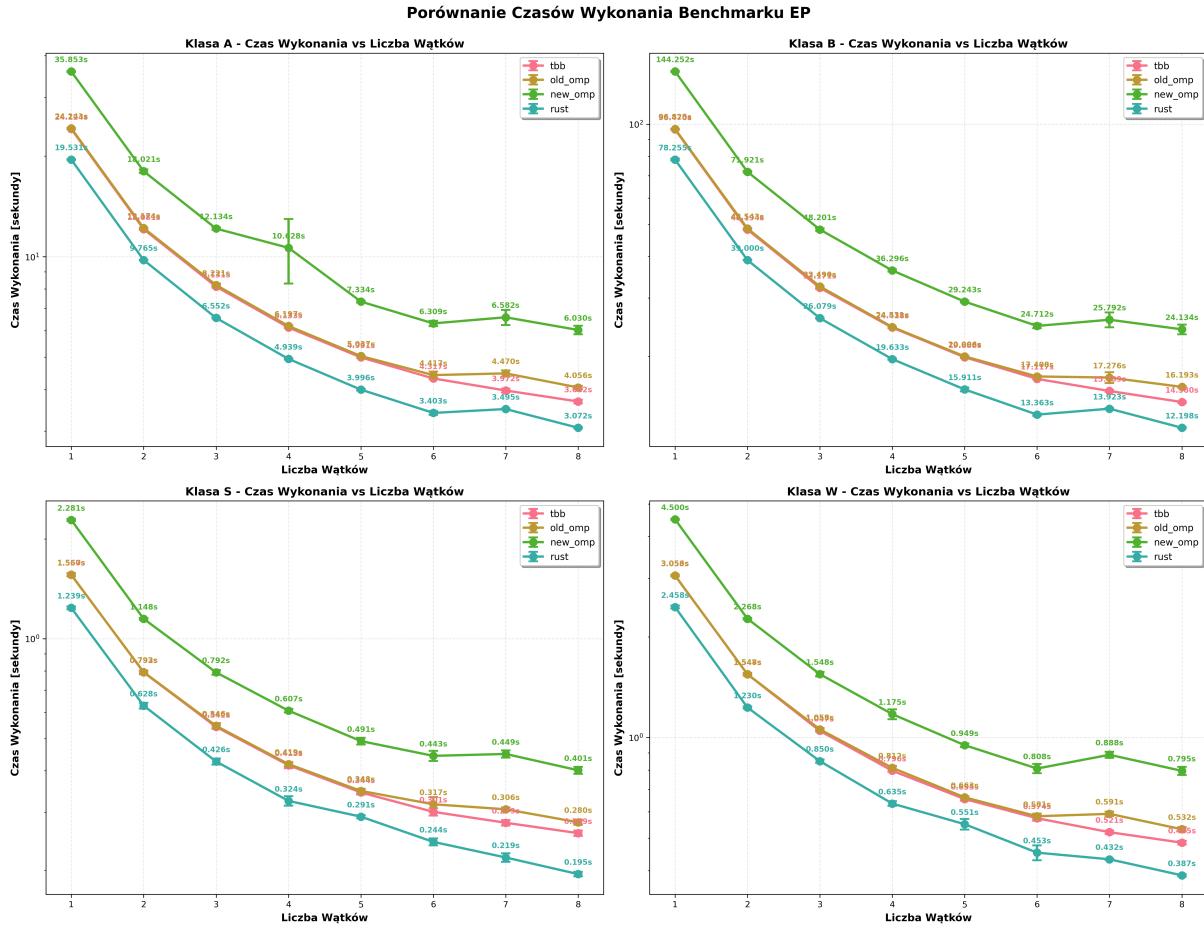
Rys. 9.22: Analiza skalowania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Powyższy wykres - rysunek 9.22 przedstawia skalowanie wydajności benchmarku EP. Skalowanie wyrażone zostało za pomocą współczynnika przyspieszenia względem wykonania jednowątkowego i odniesione do skalowania idealnego (liniowego).

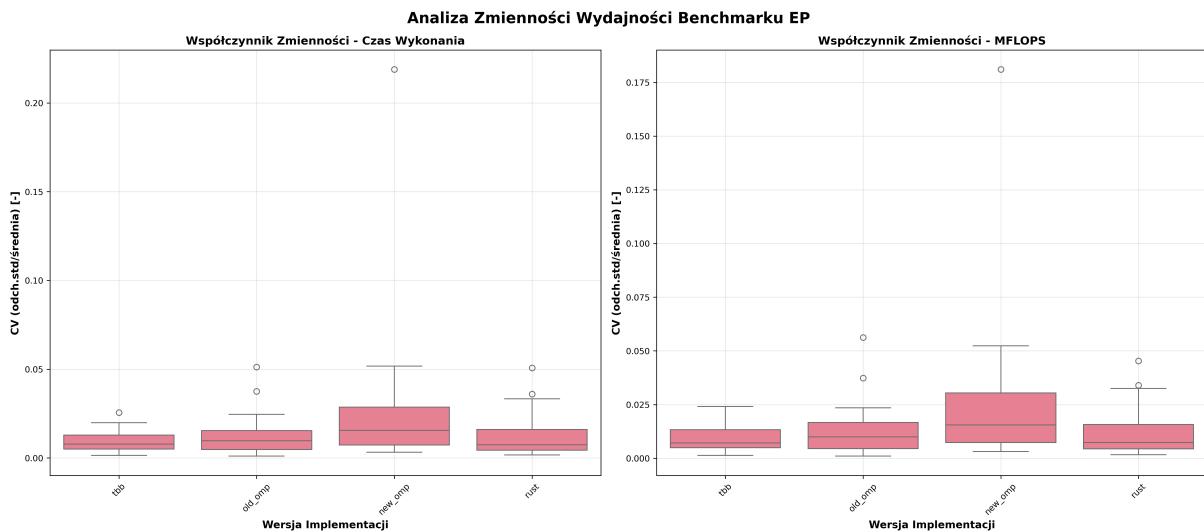
Spośród analizowanych implementacji tbb konsekwentnie osiąga najwyższe przyspieszenie we wszystkich klasach, najbardziej zbliżając się do idealnej skalowalności liniowej. Na drugim miejscu plasuje się old_omp, które wykazuje stabilne, choć nieco niższe wyniki w porównaniu do tbb. New_omp uzyskuje przyspieszenie niższe od old_omp, ale wyższe od rust, która w każdej klasie osiąga najniższe wartości. Przykładowo, dla ośmiu wątków w klasie A tbb osiąga przyspieszenie rzędu 5,97x, podczas gdy rust ogranicza się do 5,10x, co ilustruje wyraźną różnicę w wydajności.

Różnice między implementacjami stają się bardziej wyraźne przy większej liczbie wątków, co wskazuje na lepszą zdolność tbb i old_omp do efektywnego wykorzystania równoległości w benchmarku EP. Subliniowy charakter skalowalności jest widoczny we wszystkich przypadkach, jednak tbb wykazuje najmniejsze odstępstwo od idealnego wzrostu, sugerując wyższą efektywność w zarządzaniu wątkami i minimalizacji narzutów.

9.2.2. Wyniki benchmarków - platforma x86_64



Rys. 9.23: Porównanie czasów wykonania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków



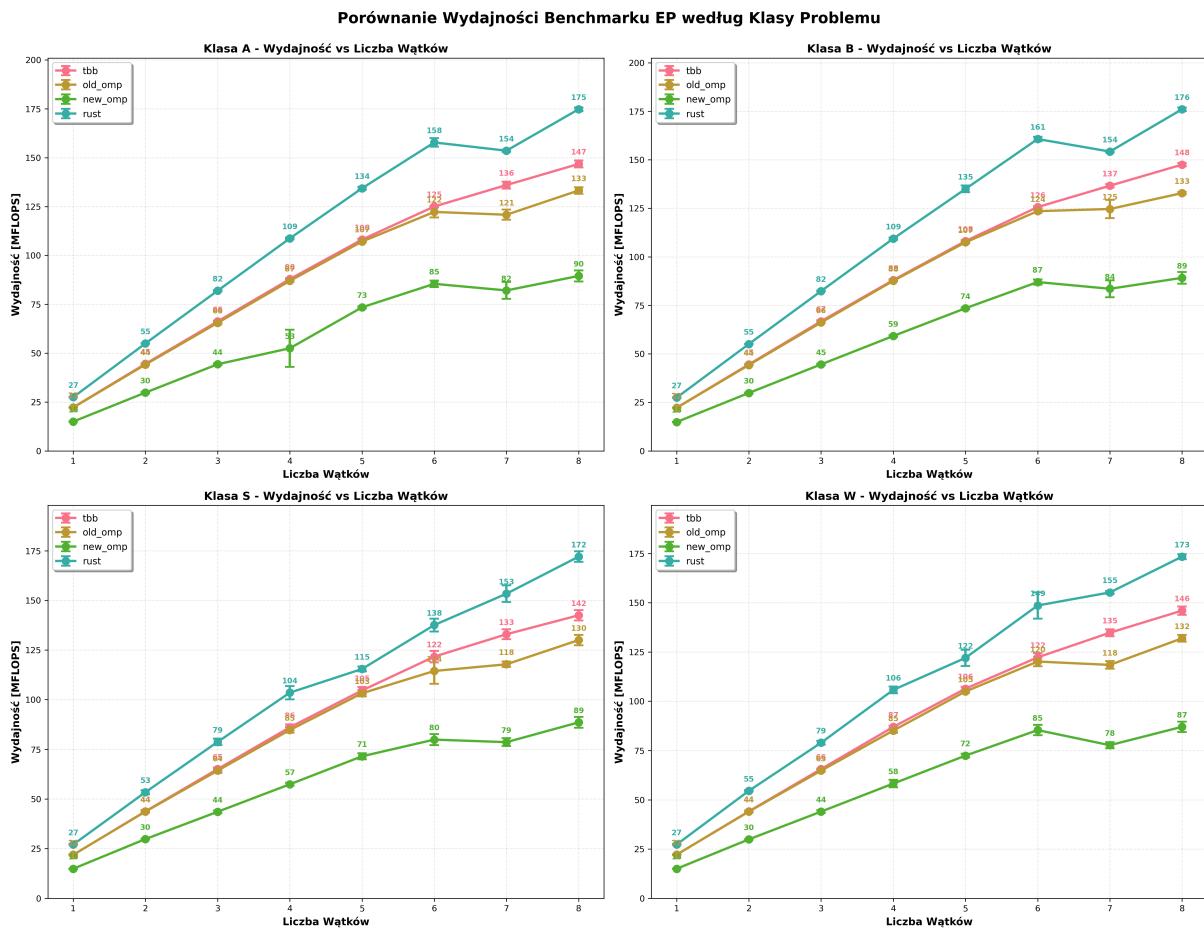
Rys. 9.24: Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Analiza danych wskazuje, że implementacja rust konsekwentnie osiąga najniższe czasy wykonania przy maksymalnej liczbie wątków (8) we wszystkich klasach, co świadczy o jej wyższości w

kontekście obliczeń równoległych. W porównaniu do pozostałych implementacji, rust wykazuje zauważalną przewagę, szczególnie wyraźną w klasach S i W, gdzie różnice w czasach wykonania są bardziej znaczące. Implementacja ttb plasuje się na drugim miejscu pod względem wydajności, podczas gdy old_omp i new_omp charakteryzują się wyższymi czasami wykonania, z new_omp wykazującym najniższą efektywność.

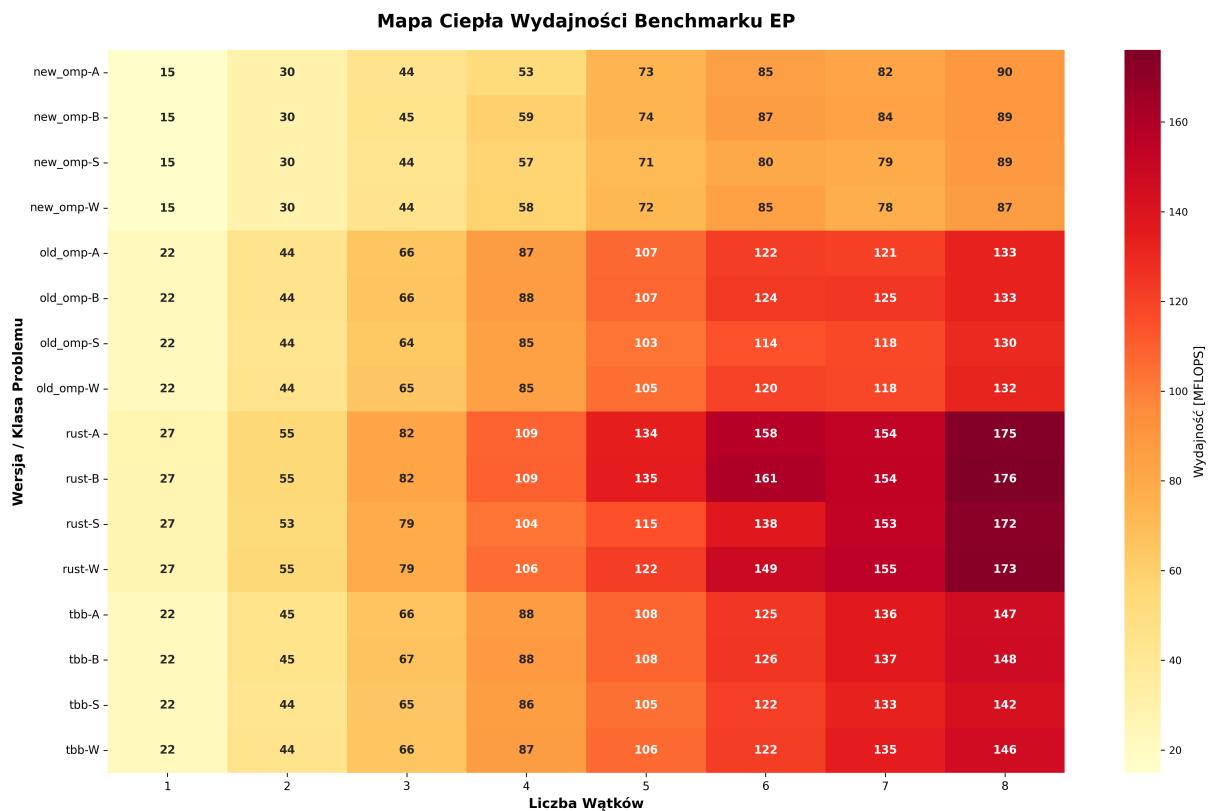
Interpretując wykresy - rysunek 9.24, można zauważyć, że dla wszystkich wersji implementacji wartości współczynnika zmienności są stosunkowo niskie, co oznacza wysoką powtarzalność i stabilność pomiarów. Najwyższą zmienność, zarówno dla czasu wykonania, jak i MFLOPS, obserwuje się w przypadku implementacji new_omp, co sugeruje, że wyniki tej wersji są mniej stabilne w porównaniu do pozostałych. Implementacje tbb, old_omp oraz rust charakteryzują się niższymi wartościami CV, co świadczy owiększej niezawodności uzyskiwanych rezultatów.

Warto zwrócić uwagę na obecność pojedynczych punktów poza głównym zakresem wykresów, które mogą wskazywać na sporadyczne przypadki większych odchyleń w pomiarach, jednak nie wpływają one znacząco na ogólną ocenę stabilności.



Rys. 9.25: Porównanie wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Na rysunku 9.25 przedstawiono porównanie wydajności benchmarku EP w milionach operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę (MFLOPS) dla różnych klas problemu i liczby wątków. Wartości zostały przedstawione w skali logarytmicznej, co pozwala lepiej zobrazować różnice między implementacjami.



Rys. 9.26: Mapa ciepła wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Mapa ciepła - rysunek 9.26 przedstawia wydajność benchmarku EP w zależności od liczby użytych wątków. Odcienie koloru od żółtego do ciemnoczerwonego wskazują na wzrost wydajności.

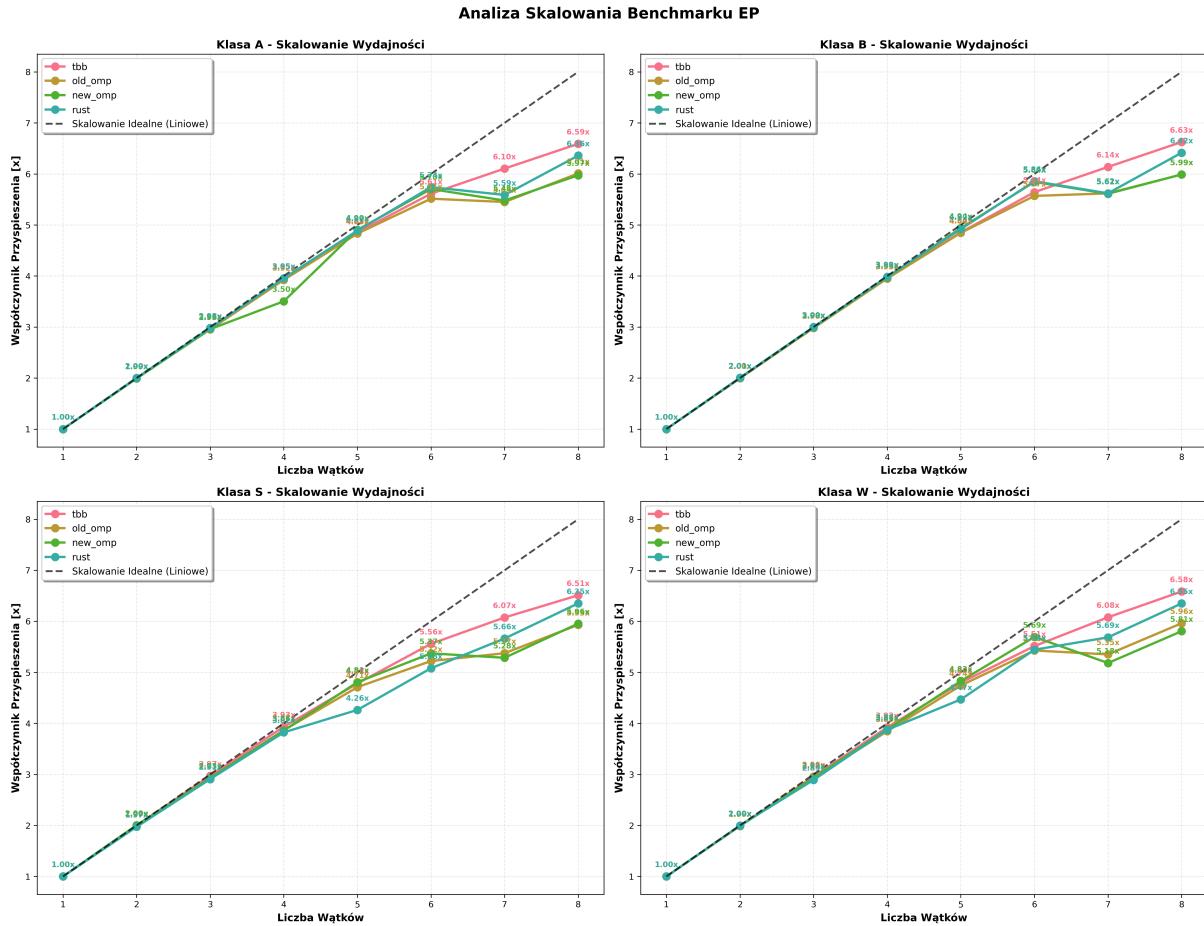
Wszystkie analizowane implementacje wykazują wzrost wydajności wraz ze zwiększaniem liczby wątków, co jest zgodne z oczekiwaniami dla algorytmów równoległych typu embarrassingly parallel. Najbardziej dynamiczny przyrost wydajności obserwowany jest w zakresie od 1 do 5 wątków. Po przekroczeniu tego progu krzywe wzrostu zaczynają się wyraźnie spłaszczać, co sugeruje osiągnięcie punktu nasycenia zasobów sprzętowych.

Spośród wszystkich rozwiązań, najwyższą wydajność osiąga implementacja napisana w języku Rust, konsekwentnie uzyskując największe wartości MFLOPS dla każdej z klas problemu. Przy 8 wątkach osiąga ona poziom około 172-176 MFLOPS, a jej przewaga staje się szczególnie widoczna przy wyższych stopniach równoległości.

Na drugim miejscu pod względem wydajności plasuje się implementacja TBB, osiągająca przy 8 wątkach wartości w przedziale około 142-148 MFLOPS. Niewiele niższe wyniki uzyskuje old_omp, którego maksymalna wydajność w tej konfiguracji wynosi około 130-133 MFLOPS.

Najniższe rezultaty pod względem MFLOPS odnotowano dla implementacji new_omp, która przy 8 wątkach osiąga maksymalnie około 87-90 MFLOPS.

Dodatkowo, we wszystkich implementacjach zaobserwowało się niewielkie wahania wydajności pomiędzy 6 a 7 wątkami. Może to wskazywać na wpływ czynników zależnych od architektury sprzętowej lub mechanizmów zarządzania zasobami stosowanych przez system operacyjny.



Rys. 9.27: Analiza skalowania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Wykres - rysunek 9.27 przedstawia analizę skalowania wydajności benchmarku EP w zależności od liczby użytych wątków. Skalowanie zostało wyrażone jako współczynnik przyspieszenia względem wykonania jednowątkowego i odniesione do idealnego skalowania liniowego.

Analiza wspólnych wzorców skalowania

Analiza wykresów przedstawiających współczynniki przyspieszenia pozwala zidentyfikować kilka istotnych wzorców. We wszystkich implementacjach zaobserwowano niemal liniowe skalowanie w zakresie od 1 do 4 wątków. Współczynniki przyspieszenia w tym przedziale są zbliżone do wartości idealnej, co świadczy o wysokiej efektywności równoległej algorytmu EP w warunkach ograniczonego współdzielenia zasobów.

Po przekroczeniu czterech wątków, a więc w zakresie od 5 do 8, wszystkie implementacje zaczynają wykazywać stopniowe odchylenia od skalowania idealnego. Zjawisko to jest typowe dla obliczeń równoległych i wynika z narzutów komunikacyjnych, współdzielenia zasobów sprzętowych, a także ograniczeń wynikających z architektury systemu oraz kosztów synchronizacji.

Ciekawym elementem analizy jest występowanie lokalnego maksimum współczynnika przyspieszenia przy sześciu wątkach, po którym przy siedmiu wątkach następuje niewielki spadek. Może to wskazywać na wpływ specyfiki architektury procesora lub strategii planowania zadań stosowanych przez system operacyjny.

Przy maksymalnej liczbie ośmiu wątków ponownie obserwuje się wzrost współczynnika przyspieszenia we wszystkich implementacjach, co sugeruje efektywniejsze wykorzystanie zasobów obliczeniowych w sytuacji pełnego obciążenia systemu.

Porównanie efektywności różnych implementacji

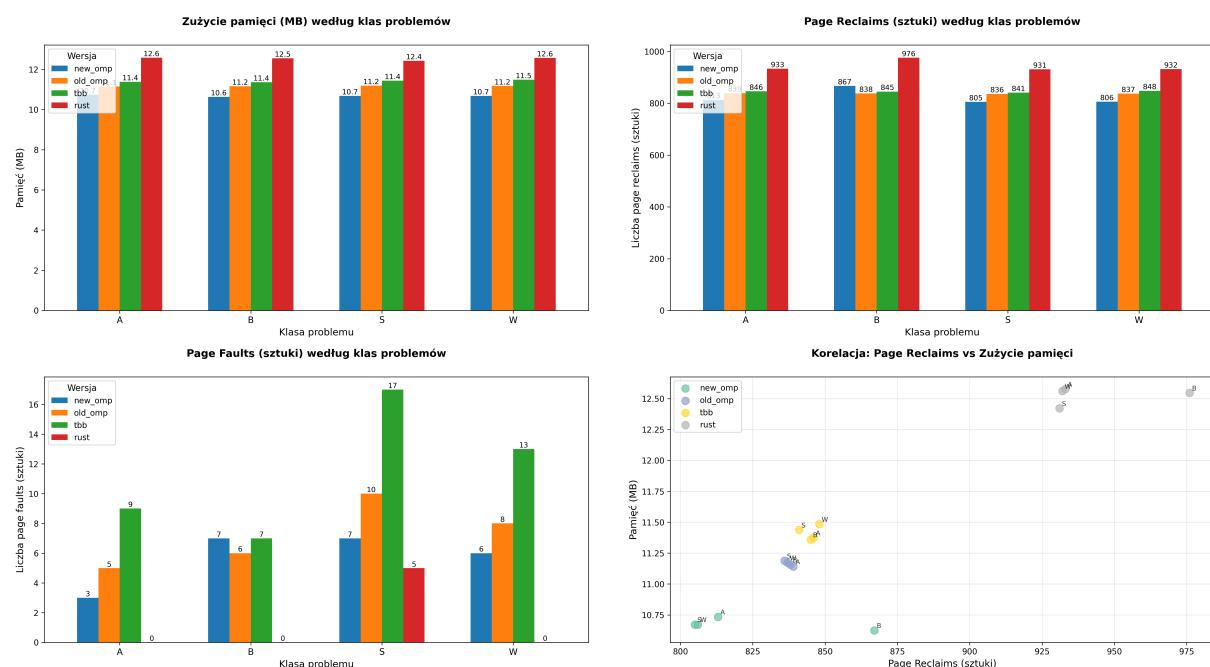
Spośród wszystkich badanych rozwiązań, implementacja w języku Rust osiąga najwyższe współczynniki przyspieszenia przy ośmiu wątkach, z wartościami rzędu 6,4-6,5x względem wersji jednowątkowej. Wskazuje to na wysoką efektywność tej implementacji pod względem skalowania równoległego.

Intel TBB uzyskuje nieznacznie niższe, lecz wciąż bardzo dobre wyniki skalowania, osiągając przyspieszenie na poziomie 6,1-6,3x przy ośmiu wątkach. Obie wersje OpenMP, tj. old_omp i new_omp, osiągają nieco niższe współczynniki przyspieszenia, mieszczące się w przedziale 5,8-6,1x, co czyni je mniej efektywnymi w porównaniu do implementacji w języku Rust oraz TBB.

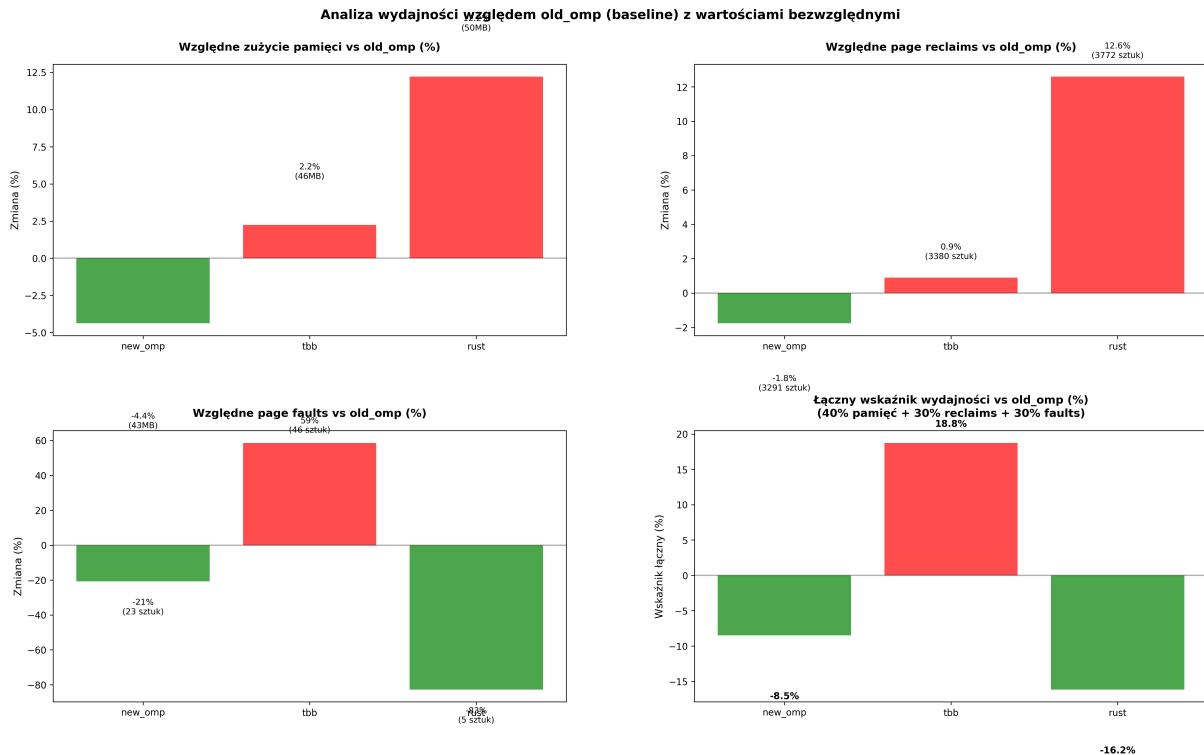
Warto również zaznaczyć, że w przedziale 4-6 wątków wszystkie implementacje osiągają bardzo zbliżone wyniki, co wskazuje na podobną efektywność w wykorzystaniu średniego poziomu równoległości oraz dostępnych rdzeni obliczeniowych.

9.2.3. Wyniki profilowania wydajności - platforma ARM64

W celu kompleksowego porównania efektywności testowanych implementacji benchmarku EP na platformie ARM64 dokonano analizy metryk systemowych dotyczących zarządzania pamięcią: zużycia pamięci (ang. *memory usage*), liczby odzyskanych stron pamięci (ang. *page reclaims*), liczby błędów stron pamięci (ang. *page faults*) oraz ich wzajemnych relacji.

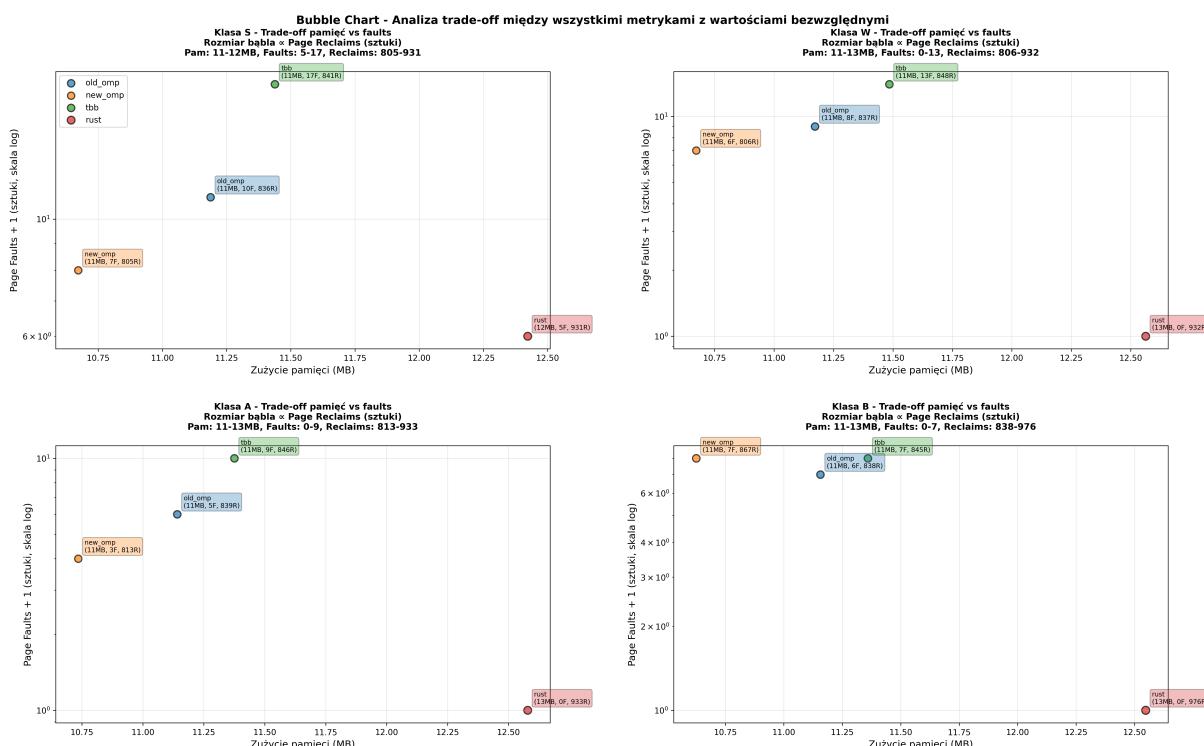


Rys. 9.28: Profilowanie wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków



Rys. 9.29: Analiza wydajności względem old_omp (punkt odniesienia) z wartościami bezwzględnymi

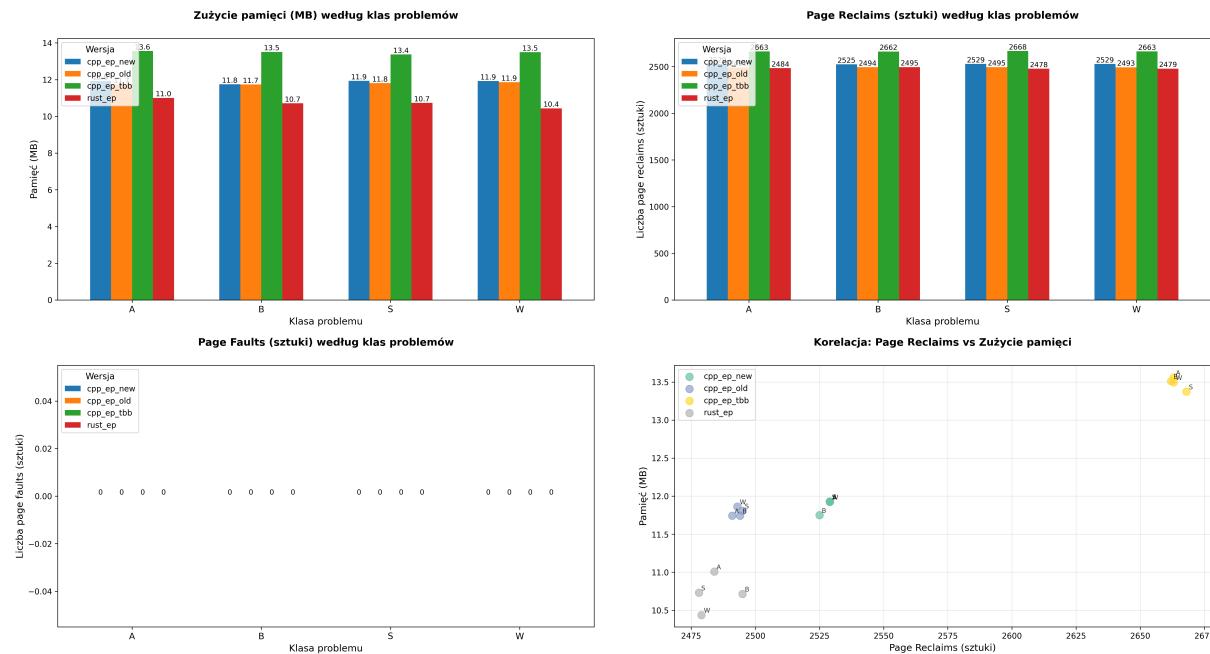
Na rysunku 9.29 zestawiono zmiany procentowe trzech analizowanych wskaźników względem implementacji referencyjnej old_omp. Wskaźnikiem syntetycznym jest łączna metryka złożona z ważonych proporcji zużycia pamięci (40%), zwolnionych stron (30%) i błędów stron (30%).



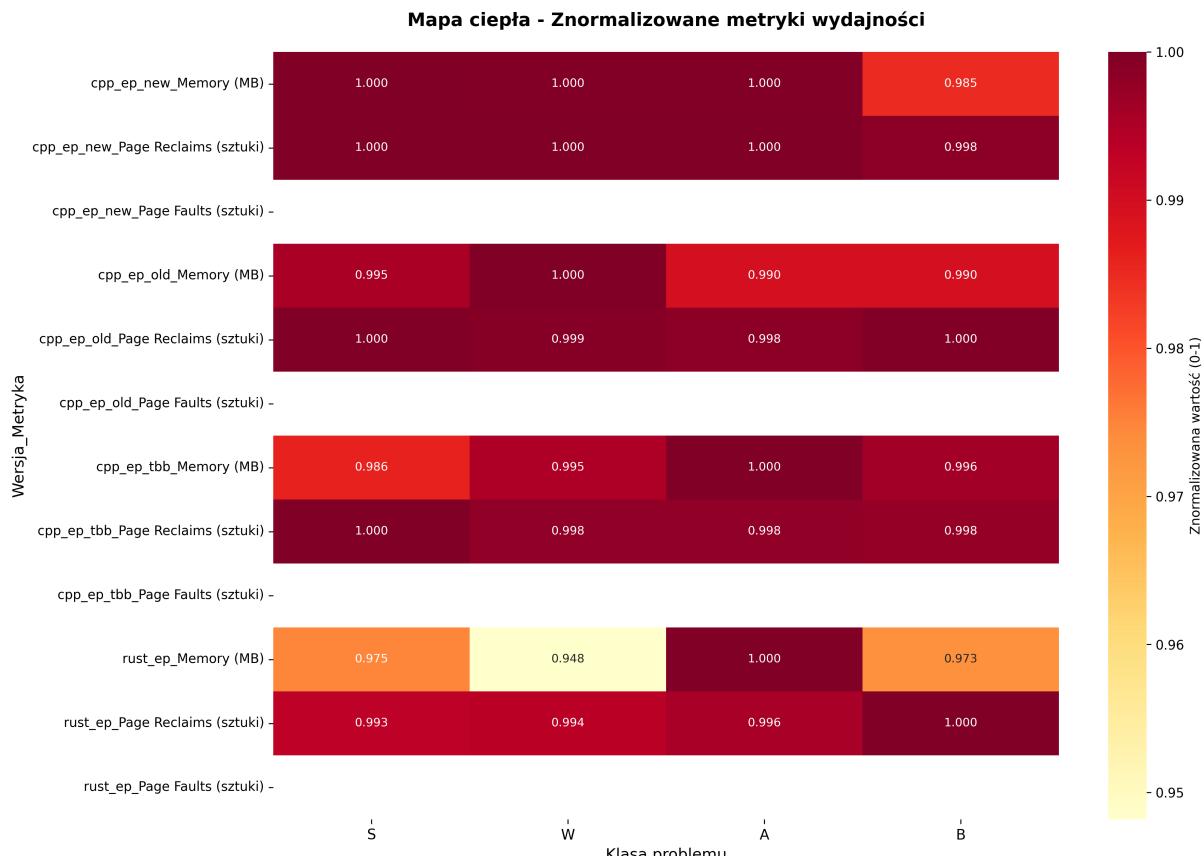
Rys. 9.30: Kompromisy (ang. *trade-off*) pomiędzy zużyciem pamięci a błędami stron pamięci, z uwzględnieniem liczby odzyskanych stron jako trzeciej zmiennej reprezentowanej przez rozmiar bąbla

Rysunek 9.30 przedstawia kompromisy(ang. *trade-offs*) między zużyciem pamięci a błędami stron, z liczbą odzyskanych stron jako trzecim wymiarem (rozmiar bąbla). Oś Y jest przedstawiona w skali logarytmicznej ze względu na zróżnicowaną skalę błędów stron.

9.2.4. Wyniki profilowania wydajności - platforma x86_64



Rys. 9.31: Profilowanie wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków



Rys. 9.32

Analiza zużycia i zarządzania pamięcią

W analizie zużycia pamięci zauważalne są istotne różnice pomiędzy implementacjami. Największe zużycie pamięci systemowej wykazuje implementacja new_omp, osiągając w każdej klasie problemu wartość rzędu 13,4-13,6 MB. Szczególnie stabilny poziom zużycia tej implementacji widoczny jest w klasach B, S i W, gdzie wartość oscyluje wokół 13,5 MB.

Zupełnie odmienną charakterystyką wyróżnia się implementacja rust, która wykazuje najniższe zużycie pamięci w przedziale 10,4-11,0 MB. Oznacza to około 22% oszczędności względem najbardziej pamięciochłonnej wersji, co świadczy o lepszym zarządzaniu alokacją zasobów. Pozostałe dwie implementacje, old_omp i tbb, prezentują bardzo zblizone wartości zużycia pamięci, mieszczące się w zakresie 11,8-11,9 MB, co pozycjonuje je pośrednio pomiędzy skrajnymi przypadkami.

Co istotne, zużycie pamięci dla każdej implementacji pozostaje stosunkowo stałe w obrębie różnych klas problemu. Sugieruje to, że wielkość instancji problemu EP nie wpływa istotnie na alokację pamięci, a struktury danych i strategie zarządzania pamięcią są zaprojektowane w sposób odporny na zmiany skali.

Operacje pamięci wirtualnej

Analiza operacji związanych z pamięcią wirtualną - w szczególności liczby odzyskanych stron oraz liczby błędów strony - dostarcza dodatkowych informacji o efektywności systemu operacyjnego i implementacji.

Wszystkie implementacje odnotowują zblizoną liczbę odzyskanych stron, w zakresie od 2475 do 2665. Najwyższy poziom zwolnień stron występuje w implementacji tbb dla klasy W (2663), podczas gdy rust konsekwentnie utrzymuje nieco niższe wartości, co może sugerować bardziej stabilne wykorzystanie przestrzeni adresowej.

Z kolei liczba błędów strony dla wszystkich implementacji wynosi zero we wszystkich klasach problemu. Taki wynik jest bardzo korzystny i świadczy o tym, że pamięć podręczna oraz fizyczna były wystarczająco pojemne, aby uniknąć konieczności odwoływania się do pamięci wymiany. Oznacza to wysoką efektywność zarządzania pamięcią operacyjną w czasie działania benchmarku.

Zależności pomiędzy metrykami pamięciowymi

Wykres korelacyjny przedstawiający relację pomiędzy liczbą zwolnień stron a zużyciem pamięci ujawnia dodatkowe zależności. Punkty na wykresie grupują się wyraźnie według implementacji, co potwierdza, że charakterystyka pamięciowa jest silnie zależna od konkretnej wersji kodu, a nie od rozmiaru instancji problemu. Implementacja rust tworzy odrębny klaster w lewej dolnej części wykresu, co potwierdza jej niskie zużycie pamięci przy niewielkiej liczbie operacji odzyskiwania stron. Z kolei new_omp formuje zbiór punktów w prawej górnej części wykresu, co jednoznacznie wskazuje na wyższe zużycie pamięci i większą liczbę zwolnień stron.

Brak silnej liniowej korelacji między tymi dwiema metrykami w obrębie każdej implementacji sugeruje, że są to względnie niezależne aspekty zarządzania pamięcią - niskie zużycie pamięci niekoniecznie musi iść w parze z mniejszą liczbą odzyskanych stron.

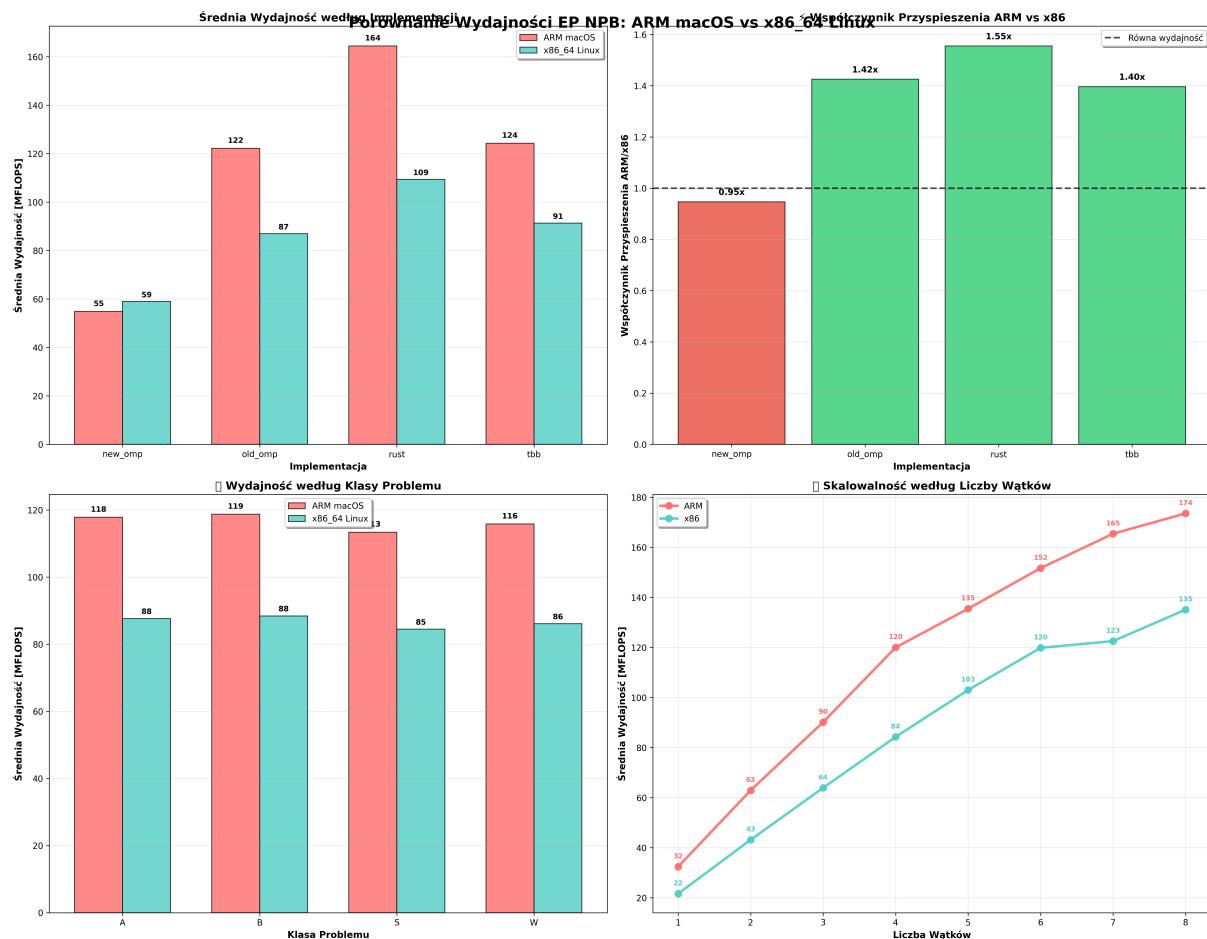
Znormalizowana mapa metryk pamięciowych

Mapa ciepła prezentująca znormalizowane wartości metryk pamięciowych uwidacznia ogólną spójność wyników oraz subtelne różnice pomiędzy implementacjami. Wartości odnoszące się do błędów strony nie są przedstawione, ponieważ wszystkie implementacje uzyskały w tym zakresie wartość zero.

Nota wyjaśniająca

Ze względu na brak błędów stron nie zamieszczono pozostałych wykresów, które byłyby oparte na tej metryce. Wykresy te nie miałyby sensu, ponieważ brak błędów stron oznacza, że wszystkie operacje pamięciowe były realizowane w ramach dostępnej pamięci fizycznej bez konieczności angażowania mechanizmów swapowania lub przenoszenia stron z dysku.

9.2.5. Porównanie pomiędzy platformami



Rys. 9.33: Porównanie średniej wydajności benchmarku EP dla platform ARM64 i x86_64

Porównanie wydajności według implementacji i architektury

Analiza średnich wartości MFLOPS dla poszczególnych implementacji w podziale na platformy sprzętowe ujawnia wyraźne różnice, wskazujące na przewagę architektury ARM. Z wyjątkiem implementacji new_omp, wszystkie rozwiązania osiągają wyższe wyniki na platformie macOS z architekturą ARM. Szczególnie wyróżnia się implementacja rust, której średnia wydajność na ARM wynosi 164 MFLOPS w porównaniu do 109 MFLOPS na platformie x86_64. Przewaga ta wynosi około 50%, co wskazuje na bardzo dobrą adaptację tej implementacji do architektury ARM.

Na obu platformach to właśnie implementacja rust osiąga najwyższe wyniki, podczas gdy new_omp pozostaje najwolniejszym wariantem. Warto zaznaczyć, że new_omp jest jedną implementacją, która uzyskuje nieco wyższą średnią wydajność na platformie x86_64 (59 MFLOPS) niż na ARM (55 MFLOPS), co może świadczyć o ograniczonej optymalizacji tego rozwiązania pod kątem architektury ARM.

Współczynniki przyspieszenia obliczone jako stosunek średniej wydajności na ARM względem x86_64 potwierdzają powyższe obserwacje. Najwyższy współczynnik (1,55x) notuje implementacja rust, natomiast old_omp i tbb osiągają zbliżone wartości odpowiednio 1,42x i 1,40x. Jedyną implementacją z wartością poniżej jedności (0,95x) pozostaje new_omp, co oznacza względnie słabsze skalowanie na ARM.

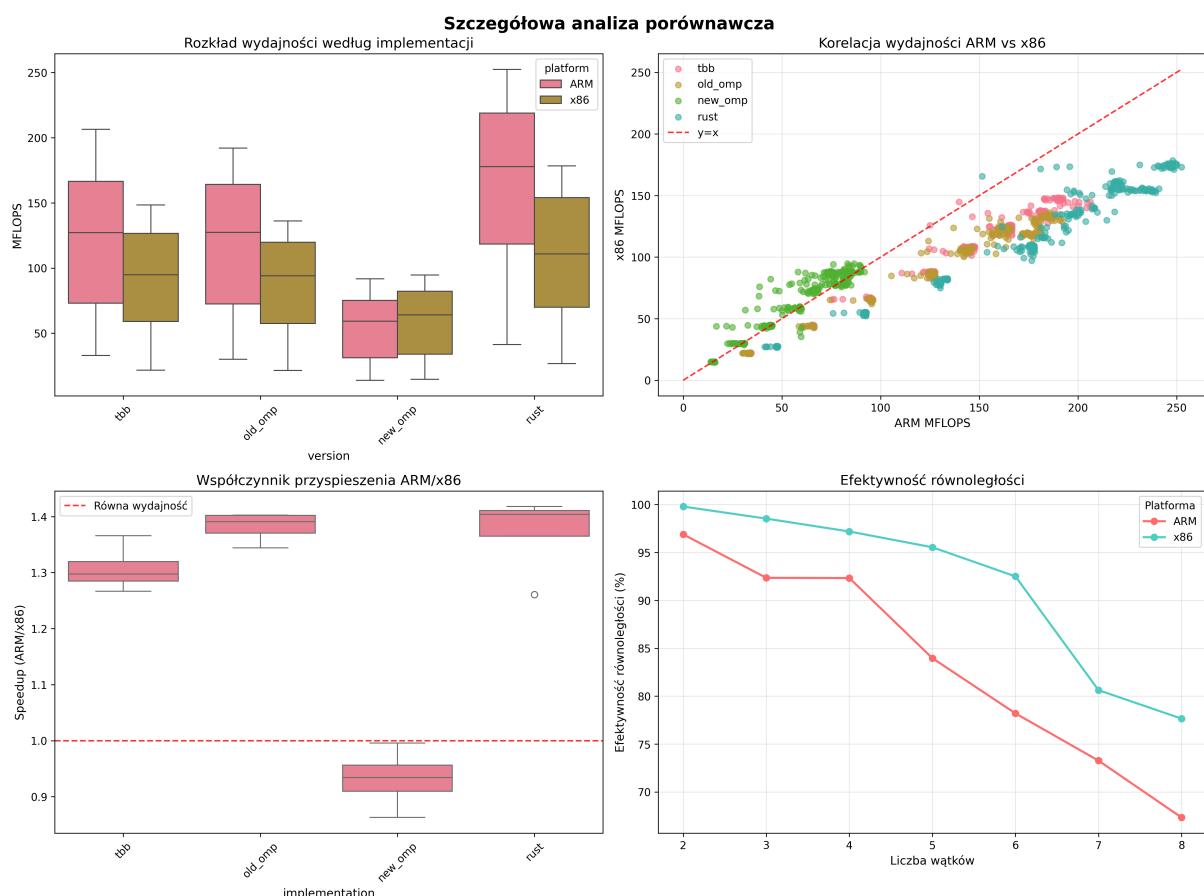
Wydajność w zależności od klasy problemu

Analiza wydajności w podziale na klasy problemowe, wykazuje spójną przewagę platformy ARM we wszystkich rozmiarach instancji. Dla każdej klasy problemowej wartości MFLOPS utrzymują się na zbliżonym poziomie, co sugeruje dobrą skalowalność algorytmu niezależnie od rozmiaru danych wejściowych. Średnie wartości dla platformy ARM mieszczą się w przedziale 118-119 MFLOPS, natomiast dla platformy x86_64 wynoszą około 85-88 MFLOPS. Przewaga ARM w tym ujęciu wynosi około 35%, co potwierdza, że jest to systemowo korzystniejsza architektura dla danego typu obciążen obliczeniowych.

Skalowanie według liczby wątków

Wykresy prezentujące wydajność w zależności od liczby wątków ukazują zbliżone trendy dla obu architektur. W obu przypadkach obserwuje się niemal liniowy wzrost wydajności do poziomu 5-6 wątków, po czym przyrost staje się bardziej umiarkowany. Jest to zgodne z typowym zachowaniem dla aplikacji równoległych, w których narzuty synchronizacji i ograniczenia sprzętowe zaczynają odgrywać większą rolę przy dalszym zwiększeniu liczby wątków.

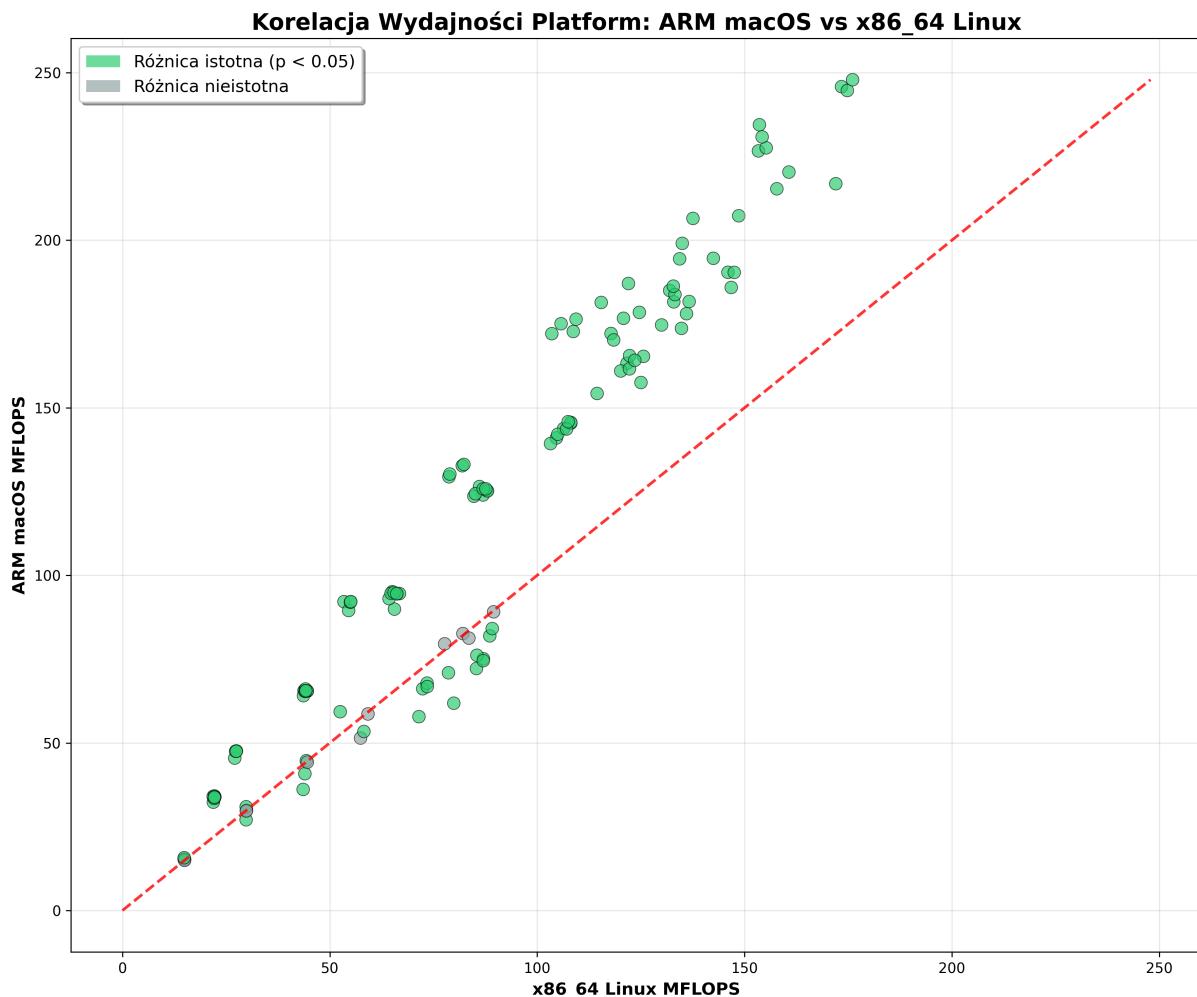
Pod względem wartości bezwzględnych platforma ARM osiąga wyższe maksima - przy 8 wątkach wydajność sięga około 174 MFLOPS, podczas gdy dla x86_64 wynosi ona 135 MFLOPS. Również ogólna efektywność skalowania jest nieco wyższa na ARM, choć analiza wykresów efektywności równoległej wskazuje na szybszy spadek tej metryki przy większej liczbie wątków. Dla ośmiu wątków efektywność na ARM spada do około 68%, podczas gdy na x86_64 utrzymuje się na poziomie około 78%. Może to wskazywać na większą wrażliwość architektury ARM na narzuty związane z wielowątkowością.



Rys. 9.34: Szczegółowa analiza wydajności benchmarku EP dla platform ARM64 i x86_64

Wyniki uzupełnia analiza rozkładów i korelacji wydajności dla obu platform - rysunek 9.34. Wykresy pudełkowe dla implementacji rust, old_omp oraz tbb pokazują wyraźne przesunięcie mediany i całego rozkładu ku wyższym wartościami na platformie ARM. Sugeruje to nie tylko wyższą średnią wydajność, ale także większą stabilność działania w zakresie typowych przypadków.

Wykres korelacji wydajności między platformami wskazuje na silną liniową zależność, przy czym większość punktów znajduje się wyraźnie powyżej linii $y = x$. Potwierdza to systematycznie wyższą wydajność ARM względem x86_64, szczególnie w przypadku implementacji osiągających wysokie wartości MFLOPS.



Rys. 9.35: Analiza istotności statystycznej benchmarku EP dla platform ARM64 i x86_64

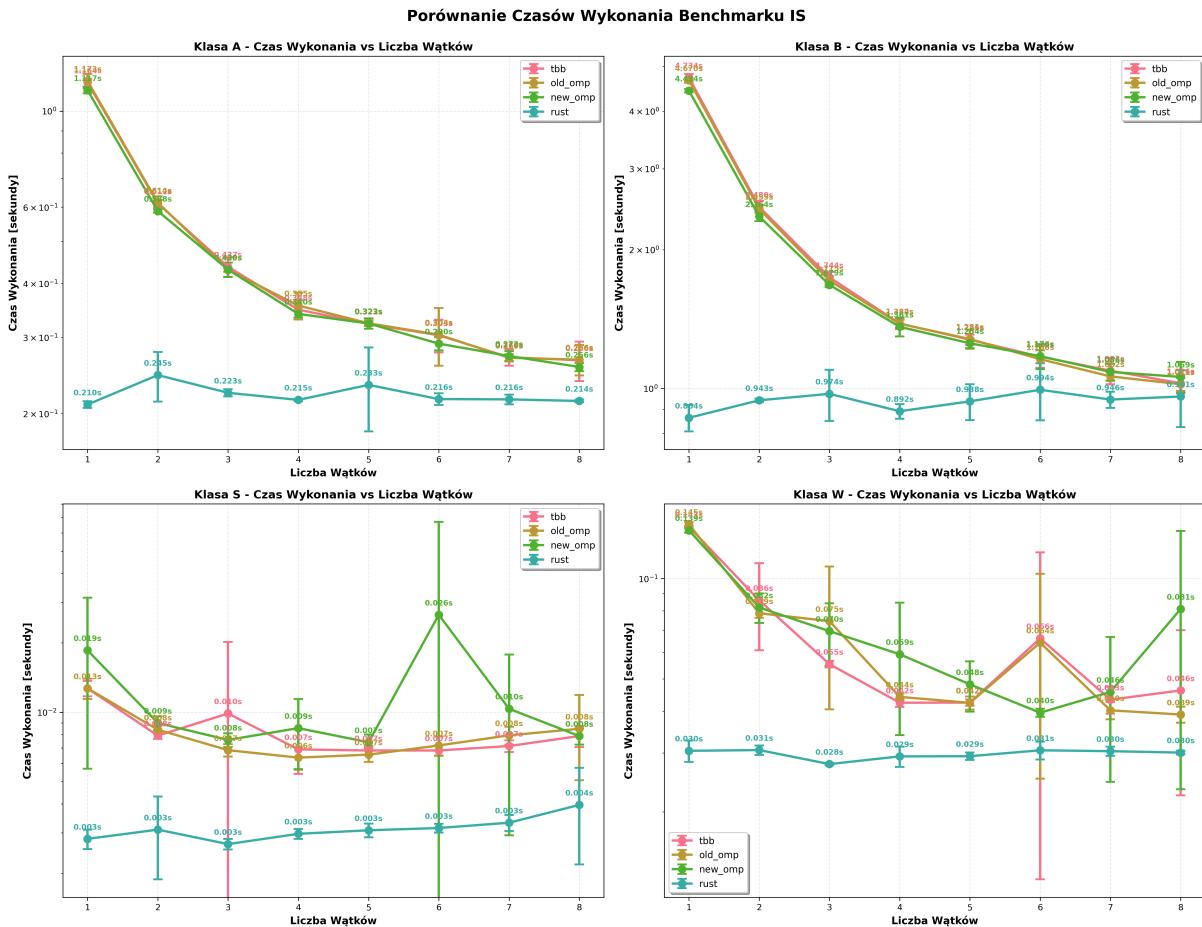
Analiza statystyczna różnic wydajności - rysunek 9.35 wykazuje, że w zdecydowanej większości przypadków różnice te są statystycznie istotne ($p < 0,05$). Podnosi to wiarygodność wniosków oraz potwierdza, że zaobserwowane efekty nie są przypadkowe, lecz wynikają z realnych różnic architektonicznych i implementacyjnych.

9.3. Benchmark IS

Celem eksperymentów była ocena efektywności implementacji algorytmu sortowania całkowitoliczbowego (Integer Sort, IS) w czterech wersjach programistycznych (new_omp, old_omp,

tbb, rust) przy różnych klasach problemów (S, W, A, B) i liczbie wątków. Porównanie obejmuje czas wykonania, wydajność (MFLOPS) oraz współczynnik zmienności (CV - coefficient of variation), obrazujący stabilność pomiarową.

9.3.1. Wyniki benchmarków - platforma ARM64



Rys. 9.36: Porównanie czasów wykonania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

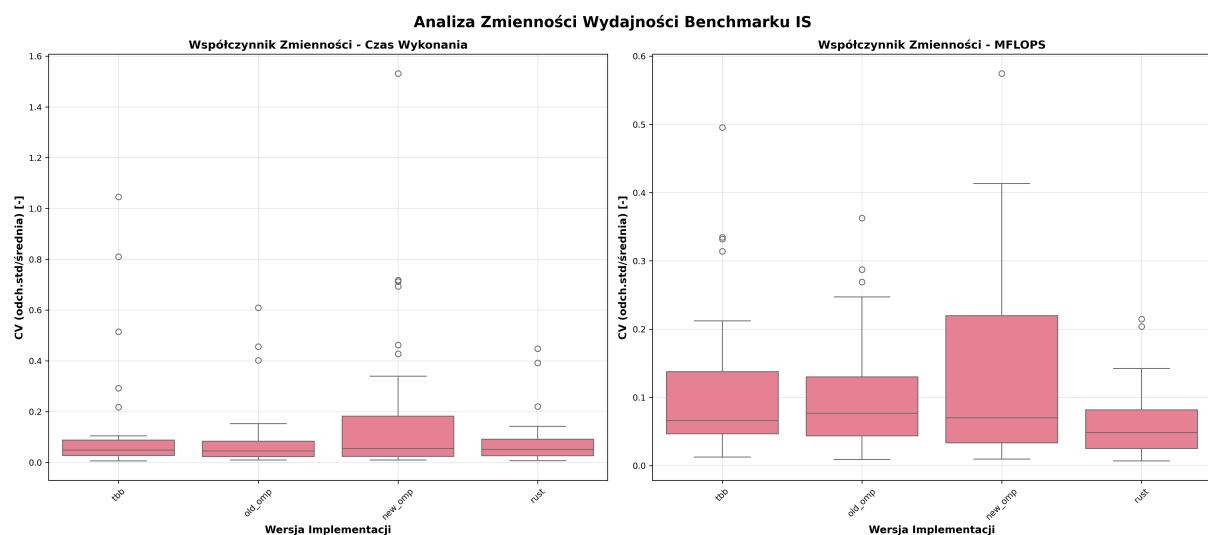
Najbardziej znaczącym obserwowanym zjawiskiem jest dominacja implementacji w języku Rust, która osiąga zdecydowanie najkrótsze czasy wykonania we wszystkich klasach problemu oraz dla wszystkich konfiguracji liczby wątków. W szczególności w klasach A i B różnice pomiędzy Rust a pozostałymi implementacjami są bardzo wyraźne i sięgają nawet kilku razy krótszych czasów wykonania, co sugeruje fundamentalnie bardziej efektywną organizację obliczeń.

W przypadku klas A i B wszystkie implementacje, z wyjątkiem Rust, wykazują systematyczny spadek czasu wykonania wraz ze wzrostem liczby wątków. Na skali logarytmicznej zależność ta przyjmuje niemal liniowy charakter, co oznacza, że wzrost liczby wątków przekłada się na wykładniczą poprawę wydajności. Szczególnie dobrze skalują się implementacje oparte na bibliotekach tbb oraz OpenMP (zarówno old_omp, jak i new_omp), co potwierdza skuteczność zastosowanych modeli równoległości dla dużych, dobrze zbalansowanych zadań.

Można zauważyć kolejne odrębne zjawisko dla implementacji w rust, której charakterystyka czasów wykonania przy zwiększeniu liczby wątków pozostaje stosunkowo płaska. Sugeruje to, że implementacja ta osiąga bardzo wysoką wydajność już przy niskim poziomie równoległości, a dalsze zwiększenie liczby wątków nie przynosi istotnych korzyści.

W mniejszych klasach problemu, takich jak S i W, obserwuje się znacznie większą nieregularność skalowania oraz większą wariancję wyników. Jest to zgodne z oczekiwaniami, ponieważ dla niewielkich zadań narzuty związane z uruchamianiem i synchronizacją wątków często przewyższają potencjalne zyski z ich równoległego wykonania. Szczególnie widoczne jest to w przypadku implementacji new_omp, która w klasie W wykazuje nawet wzrost czasu wykonania przy 6 i 8 wątkach, co może być efektem niewłaściwego rozkładu pracy lub kosztów synchronizacji przewyższających zyski z równoległości.

Dalsza analiza 9.36 według klas problemu pozwala zauważyc, że w klasach A i B - reprezentujących większe instancje obliczeniowe - implementacje tbb, old_omp i new_omp osiągają bardzo podobne czasy wykonania i wykazują zbliżone wzorce skalowania. Ich wydajność rośnie do poziomu 8 wątków, po czym tempo przyrostu stopniowo maleje. W tym samym czasie Rust konsekwentnie utrzymuje swoją przewagę, osiągając czasy wykonania nawet pięciokrotnie krótsze. W mniejszych klasach (S i W) efektywność równoległości staje się mniej przewidywalna. Różnice między implementacjami są mniej wyraźne, a korzyści z równoległości często stają się marginalne powyżej czterech wątków.



Rys. 9.37: Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Analiza zmienności czasu wykonania

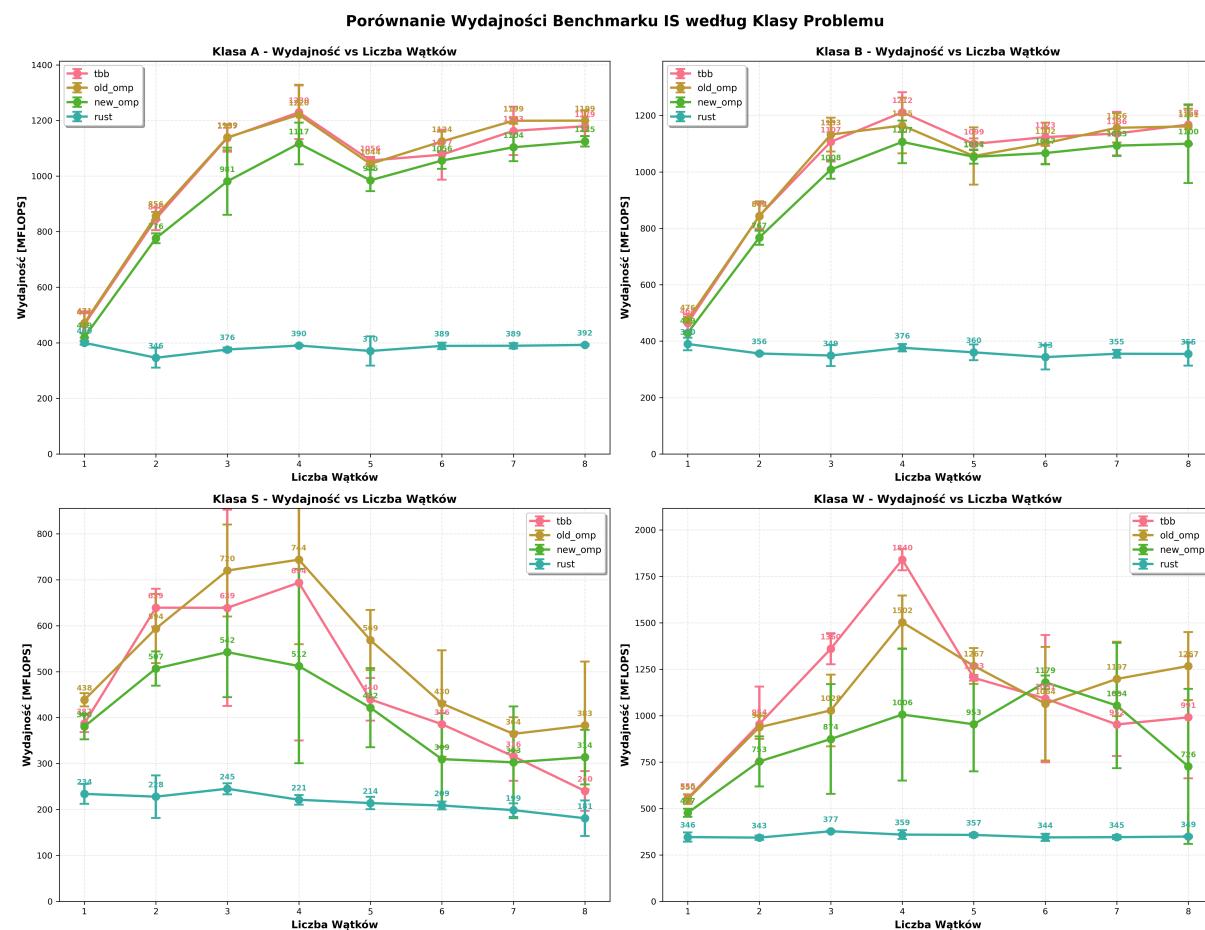
Lewy wykres - rysunek 9.37 ilustruje współczynnik zmienności (CV) dla czasu wykonania. Na jego podstawie można zauważyc, że większość pomiarów, niezależnie od użytnej implementacji, cechuje się niskim poziomem zmienności - wartości median CV mieszczą się w zakresie od około 0,05 do 0,1. Świadczy to o wysokiej powtarzalności wyników i braku istotnych fluktuacji czasowych w typowych warunkach testowych.

Spośród wszystkich badanych rozwiązań, implementacja napisana w języku Rust charakteryzuje się najniższą medianą współczynnika zmienności, co wskazuje na najbardziej przewidywalne czasy wykonania. Z kolei implementacja new_omp wykazuje nieco wyższą zmienność i szerszy rozrzut wartości, co może świadczyć o mniej stabilnym zachowaniu w czasie - być może z powodu większego wpływu czynników systemowych lub charakterystyki zastosowanego modelu równoległości. Warto również zwrócić uwagę na obecność wartości odstających we wszystkich implementacjach. Największe ekstremalne wartości współczynnika zmienności czasu wykonania zaobserwowano w przypadku implementacji new_omp (sięgające nawet 1,5) oraz tbb (do około 1,05), co może oznaczać sporadyczne przypadki znaczącej niestabilności czasowej.

Analiza zmienności MFLOPS

Drugi wykres przedstawia zmienność metryki MFLOPS, która - mimo że pochodna względem czasu wykonania - wykazuje ogólnie wyższy poziom zmienności. Jest to zrozumiałe, biorąc pod uwagę, że wskaźnik ten jest bardziej podatny na mikrofluktuacje w wydajności procesora, zarządzanie energią czy zmiany częstotliwości taktowania. Również tutaj implementacja new_omp wyróżnia się najwyższą medianą współczynnika zmienności oraz największym rozrzutem wartości, co potwierdza jej ograniczoną stabilność pod względem uzyskiwanej wydajności. Z drugiej strony, implementacja Rust ponownie osiąga najlepsze wyniki, z najniższą zmiennością i relatywnie wąskim zakresem obserwowanych wartości, co świadczy o jej konsekwentnej wydajności niezależnie od liczby powtórzeń czy konfiguracji.

Rozkład współczynnika zmienności MFLOPS jest ogólnie mniej symetryczny niż w przypadku czasu wykonania. Szczególnie dla implementacji tbb i new_omp obserwuje się wyraźną asymetrię wykresów pudełkowych, co może sugerować występowanie bardziej złożonych zjawisk wpływających na wahania wydajności. Najwyższa wartość odstojąca w tym przypadku - około 0,58 - również dotyczy implementacji new_omp, co po raz kolejny podkreśla jej względnie niższą stabilność. Ogółem, analiza zmienności wskazuje, że choć większość implementacji zapewnia akceptowalny poziom powtarzalności, to Rust wyróżnia się nie tylko pod względem szybkości, ale również przewidywalności działania, co czyni go najbardziej stabilnym rozwiązaniem spośród badanych.



Rys. 9.38: Porównanie wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użycytych wątków

Na wykresach na rysunku 9.20 zaprezentowano porównanie wydajności benchmarku IS mierzonej w MFLOPS (milionach operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę). Wydajność została przedstawiona jako funkcja liczby wątków (1-8) dla czterech implementacji równoległych.

Analiza zależności wydajności od liczby wątków ujawnia nietypowy wzorzec skalowania. W przeciwieństwie do klasycznych benchmarków, w których można zaobserwować proporcjonalny wzrost wydajności wraz ze wzrostem liczby wątków, implementacje tbb, old_omp oraz new_omp wykazują poprawę wydajności jedynie do poziomu 3-4 wątków. Po tym punkcie wydajność zaczyna się stabilizować, a w niektórych przypadkach wręcz nieznacznie spada. Może to wskazywać na istnienie fundamentalnych ograniczeń wynikających z przepustowości pamięci lub narzutu synchronizacji, które skutecznie ograniczają dalsze korzyści wynikające z równoległości.

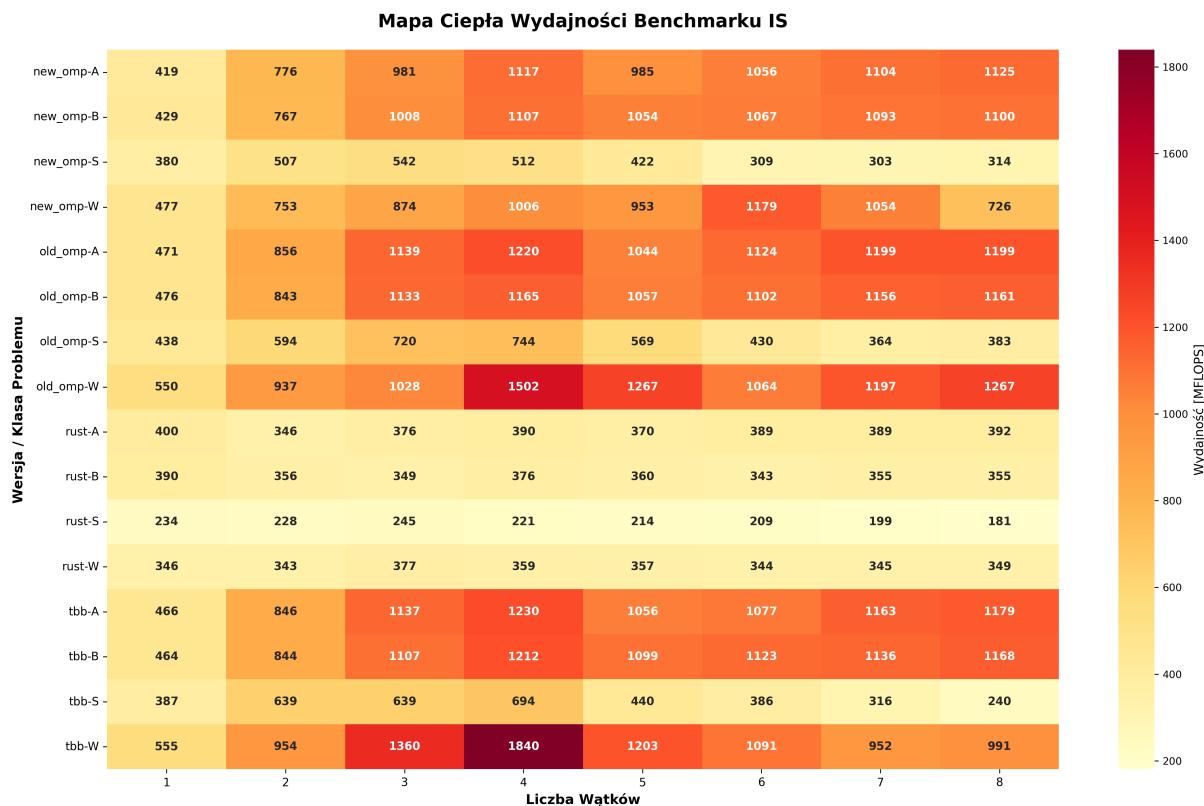
W przypadku mniejszych klas problemowych, takich jak S i W, obserwowane wzorce są jeszcze bardziej nieregularne. Wydajność często osiąga maksimum przy 3-4 wątkach, po czym wyraźnie spada. Szczególnie interesujący jest przypadek implementacji tbb w klasie W, która osiąga imponującą wartość 1840 MFLOPS przy czterech wątkach - najwyższą ze wszystkich konfiguracji w całym badaniu. Takie lokalne maksima sugerują silną zależność algorytmu od konkretnej wielkości danych i liczby wątków, co może wynikać z efektów dopasowania do rozmiaru cache lub harmonogramu zadań.

W wyraźnym kontraście pozostaje implementacja w języku Rust, która wykazuje niezwykle stabilne zachowanie. Jej wydajność pozostaje na stosunkowo stałym poziomie bez względu na liczbę wątków. Choć osiągane wartości MFLOPS są zauważalnie niższe niż w pozostałych implementacjach - dla klas A i B mieszczą się w zakresie 350-400 MFLOPS, a dla S i W wynoszą 200-350 MFLOPS - to cechują się wysoką regularnością. Taki rozkład sugeruje, że Rust wykorzystuje inną strategię wykonania, bardziej odporną na zmienność środowiska wykonawczego, ale jednocześnie mniej efektywną w pełnym wykorzystaniu potencjału równoległego sprzętu.

Porównując osiągi różnych implementacji, zauważa się wyraźną dominację tbb i old_omp w klasach A i B. Obie te implementacje osiągają szczytowe wartości na poziomie około 1200 MFLOPS przy użyciu 3-4 wątków, natomiast new_omp nieznacznie ustępuje im, osiągając maksymalnie około 1100 MFLOPS. Różnice te są niewielkie, ale powtarzalne i mogą wskazywać na subtelne różnice w sposobie zarządzania wątkami lub rozdzielania zadań.

W mniejszych klasach problemowych różnice pomiędzy implementacjami są wyraźniejsze, a uzyskane rezultaty mniej przewidywalne. Po raz kolejny wyróżnia się tutaj implementacja tbb, która w klasie W bije rekord wydajności, osiągając wspomniane 1840 MFLOPS. Skalowanie w tych klasach jest nierówne i często nieliniowe, co świadczy o dużej wrażliwości na liczbę wątków oraz właściwości algorytmu w kontekście niewielkich zbiorów danych.

Implementacja rust utrzymuje konsekwentnie niższy poziom wydajności we wszystkich klasach i konfiguracjach. Jest to zaskakujące, biorąc pod uwagę jej bardzo dobre wyniki w innych benchmarkach, takich jak EP.

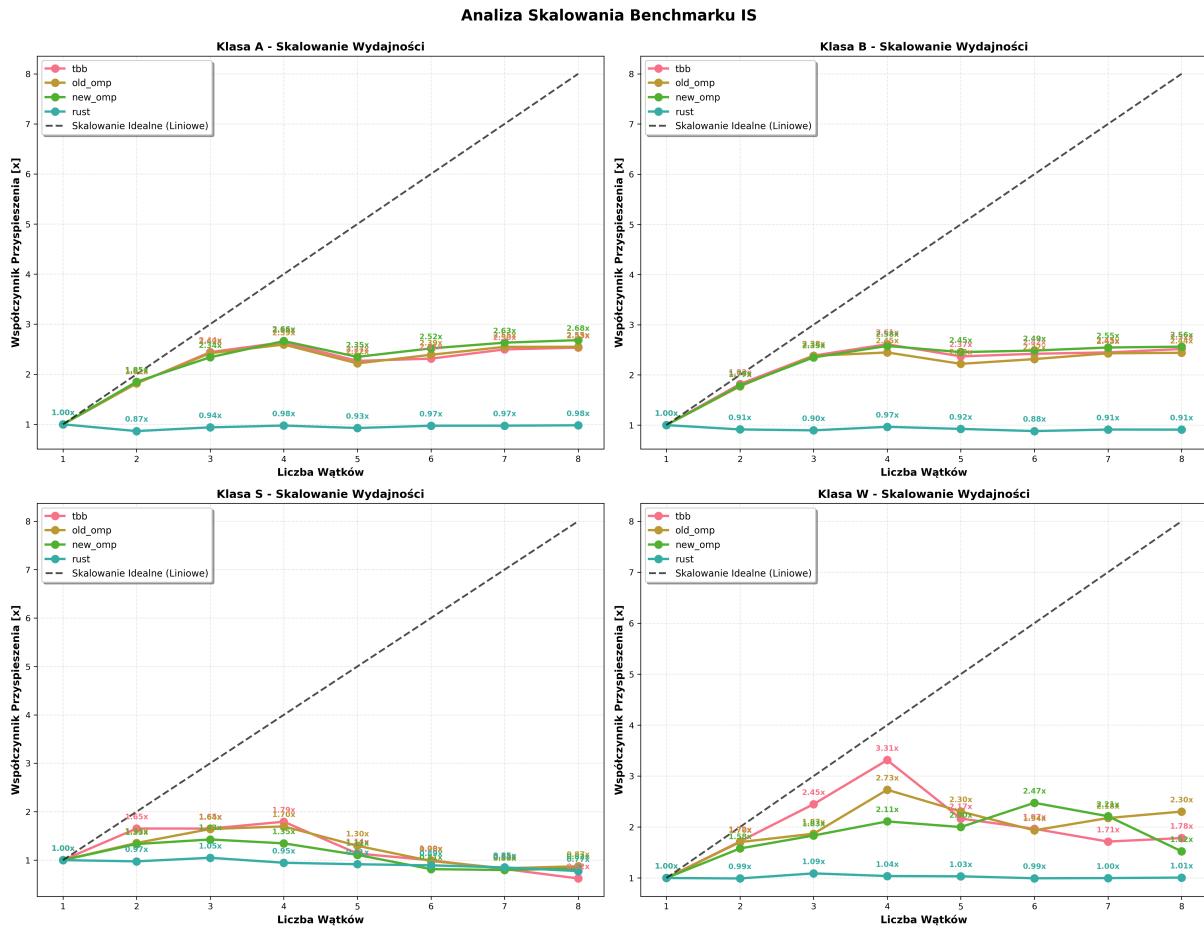


Rys. 9.39: Mapa ciepła wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Powyższa mapa cieplna - rysunek 9.21 przedstawia wydajność (w MFLOPS). Wydajność została przedstawiona w zależności od liczby użytych wątków. Odcienie koloru od żółtego do ciemnoczerwonego wskazują na wzrost wydajności.

W klasie S wydajność wszystkich implementacji jest wyraźnie niższa, co manifestuje się jako jaśniejszy poziomy pas na mapie. Jest to efekt słabego skalowania oraz niewielkich rozmiarów danych, które ograniczają możliwość efektywnego podziału pracy między wątki. Z kolei wiersze odpowiadające implementacjom rust są dość jednolite i jasne, co potwierdza zarówno niższą ogólną wydajność, jak i brak znaczącego wpływu liczby wątków na wynik końcowy.

Wreszcie, klasa W ukazuje największe wahania, co dobrze ilustrują nieregularne "gorące punkty" - obszary lokalnej maksymalnej wydajności wśród ogólnego spadku, szczególnie dla tbb i old_omp. Te wahania wskazują na wysoką czułość algorytmu IS względem parametrów wykonania i potwierdzają, że efektywność obliczeń w tym benchmarku jest silnie uzależniona od konkretnych kombinacji danych wejściowych i zasobów sprzętowych



Rys. 9.40: Analiza skalowania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Analiza wykresów 9.40 przedstawiających współczynnik przyspieszenia w zależności od liczby wątków ujawnia wyraźne odstępstwa od idealnego skalowania. Choć teoretycznie przyspieszenie powinno rosnąć proporcjonalnie do liczby wątków (co ilustruje linia przerywana na wykresach), w rzeczywistości wartości te osiągają jedynie poziom 2,6-3,3x nawet przy ośmiu wątkach. Taki wynik świadczy o istotnych ograniczeniach efektywności równoległego przetwarzania w przypadku benchmarku IS.

We wszystkich implementacjach i klasach problemowych wyraźnie zaznacza się punkt nasycenia wydajności - lokalna efektywność równoległa osiągana jest zazwyczaj przy 3-4 wątkach. Po przekroczeniu tego progu przyrosty wydajności ulegają zahamowaniu, a w niektórych przypadkach nawet dochodzi do jej spadku. Sugeruje to, że kluczowym czynnikiem ograniczającym skalowanie nie jest sama liczba dostępnych rdzeni, lecz raczej ograniczenia przepustowości pamięci, które uniemożliwiają dalsze równoległe przetwarzanie bez utraty efektywności.

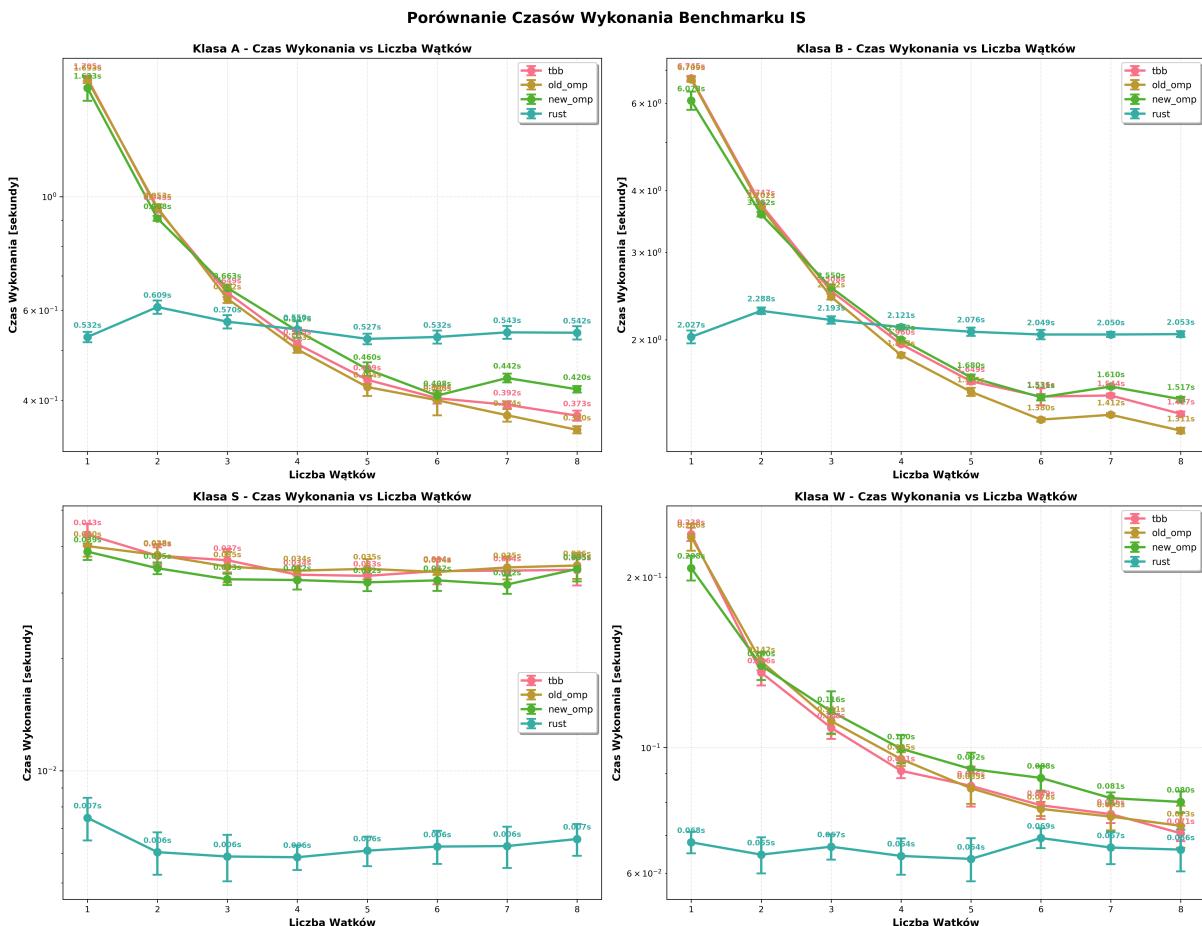
Wielu konfiguracjom towarzyszy również zjawisko niemonotoniczności przyspieszenia. Charakterystyczne są lokalne spadki współczynnika przyspieszenia przy przejściu z 4 do 5 wątków, po czym obserwuje się niewielki wzrost w zakresie 6-8 wątków. Taki przebieg może wskazywać na złożone interakcje między charakterem dostępu do pamięci a architekturą hierarchii cache procesora, które wpływają negatywnie na spójność i przewidywalność skalowania.

Porównując poszczególne implementacje, można zauważyc duże podobieństwo między tbb, old_omp i new_omp, szczególnie w klasach problemowych A i B. Wszystkie trzy osiągają maksymalne współczynniki przyspieszenia na poziomie 2,5-2,7x, co sugeruje, że ograniczenia skalowania wynikają przede wszystkim z charakterystyki algorytmu sortowania całkowitoliczbowego IS, a nie z różnic pomiędzy samymi bibliotekami równoległymi.

Na tym tle wyraźnie wyróżnia się implementacja tbb w klasie W, która przy czterech wątkach osiąga współczynnik przyspieszenia wynoszący 3,31x.

Z kolei implementacja napisana w języku Rust prezentuje zupełnie odmienny obraz. Współczynniki przyspieszenia we wszystkich klasach problemowych oscylują wokół wartości 1,0, co oznacza, że praktycznie nie uzyskuje się żadnych korzyści z wykorzystania wielu wątków. Wskazuje to na fundamentalne różnice w implementacji algorytmu lub architekturze mechanizmów współbieżności, które mogą uniemożliwić efektywne rozproszenie obciążenia obliczeniowego. W rezultacie, mimo znanej stabilności i bezpieczeństwa języka Rust, w tym konkretnym scenariuszu nie udaje się wykorzystać jego potencjału do osiągnięcia przyspieszenia równoległego.

9.3.2. Wyniki benchmarków - platforma x86_64



Rys. 9.41: Porównanie czasów wykonania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Analiza czasów wykonania - rysunek 9.41 ujawnia jednoznaczna przewagę implementacji Rust, która we wszystkich klasach problemu uzyskuje najwyższe wartości czasów wykonania. Różnice te stają się szczególnie widoczne przy większej liczbie wątków. Dla przykładu, w klasie A przy ośmiu wątkach implementacja Rust osiąga czas około 0,542 sekundy, podczas gdy inne rozwiązania mieszczą się w zakresie 0,360-0,420 sekundy. Jeszcze wyraźniejsza dysproporcja występuje w klasie B, gdzie czas wykonania dla Rust wynosi około 2,05 sekundy, a dla pozostałych implementacji mieści się w przedziale 1,35-1,55 sekundy.

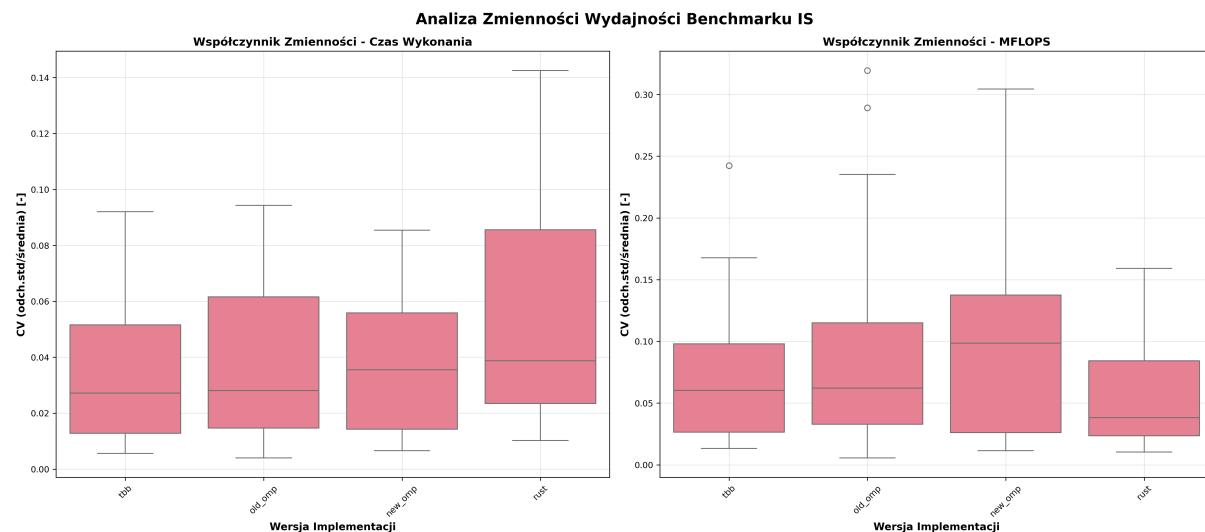
Implementacje różnią się istotnie pod względem charakterystyki skalowania wraz ze wzrostem liczby wątków. Implementacje tbb, old_omp oraz new_omp wykazują przewidywalny, choć ograniczony spadek czasu wykonania przy zwiększaniu liczby wątków. Największe zyski pojawiają się między 1 a 4 wątkami. Po przekroczeniu tego progu przyrosty stają się marginalne, a

niekiedy nawet zauważalny jest niewielki wzrost czasu. W większości konfiguracji implementacja tbb okazuje się minimalnie szybsza od pozostałych, co może wskazywać na skuteczniejszą obsługę wątków w tej bibliotece.

Z kolei implementacja Rust prezentuje niemal całkowicie płaską charakterystykę czasową dla liczby wątków większej niż jeden. W klasach A i B można wręcz zaobserwować nieznaczne pogorszenie czasu wykonania przy przejściu z jednego do dwóch wątków.

Wyraźnie zarysuje się różnica między większymi (A, B) a mniejszymi (S, W) klasami problemu. Dla klas A i B, które reprezentują bardziej wymagające obciążenia obliczeniowe, występują największe bezwzględne różnice czasów wykonania między Rust a pozostałymi implementacjami. Jednocześnie, implementacje tbb, old_omp i new_omp wykazują w tych klasach bardziej regularne i przewidywalne skalowanie, osiągając relatywnie największe przyspieszenia.

W przypadku klas S i W obserwowane różnice między implementacjami są mniej wyraźne. Czas wykonania zmienia się tu w sposób mniej przewidywalny, a przyrosty wydajności wynikające z równoległości są znacznie słabsze. W klasie W można jednak zauważać agresywne skalowanie w implementacjach tbb, old_omp i new_omp, co może świadczyć o tym, że rozmiar problemu lepiej współgra z architekturą pamięci podręcznej procesora, co z kolei przekłada się na wzrost efektywności.



Rys. 9.42: Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Stabilność czasu wykonania

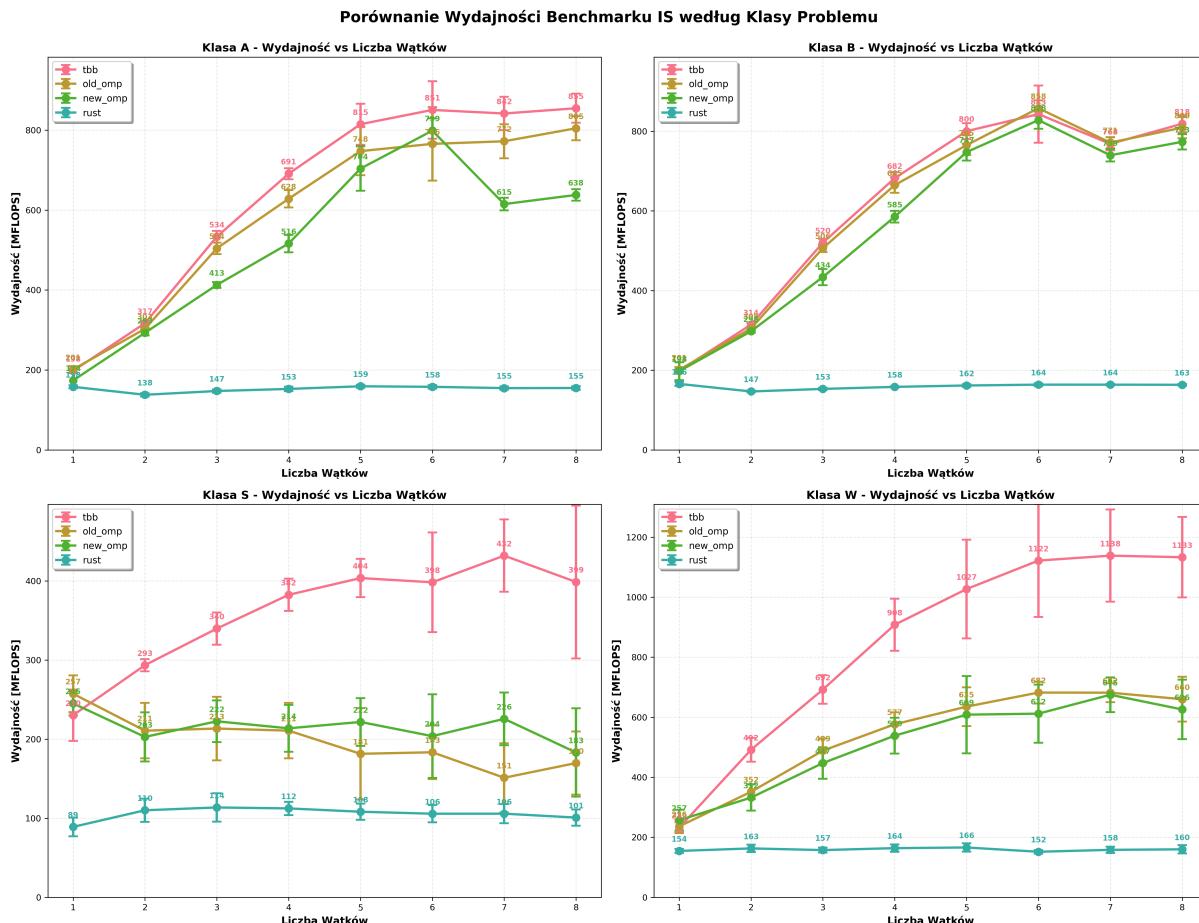
Pod względem zmienności czasów wykonania implementacja Rust wypada najsłabiej — osiąga najwyższą medianę współczynnika zmienności (około 0,04) i wykazuje szerszy rozrzut wyników, co wskazuje na większą podatność na losowe fluktuacje. Obecność licznych wartości odstających sugeruje występowanie okazjonalnych, znacznych odchyleń od typowych czasów wykonania, co może być związane z zarządzaniem wątkami bądź alokacją pamięci.

Implementacje tbb, old_omp i new_omp prezentują znacznie niższe i bardzo zbliżone wartości współczynnika zmienności, oscylujące wokół 0,025-0,03. Cechują się one także węższym zakresem wyników oraz mniejszą liczbą wartości odstających, co wskazuje na większą przewidywalność czasów wykonania i lepszą stabilność działania w środowisku wielowątkowym.

Stabilność MFLOPS

Pod względem zmienności MFLOPS najniższą medianę współczynnika zmienności (około 0,05) uzyskuje implementacja Rust, co oznacza, że pomimo dużych wahania czasów wykonania, osiągana wydajność obliczeniowa jest relatywnie stabilna.

Z drugiej strony, najwyższą medianę zmienności MFLOPS (około 0,10) osiąga implementacja new_omp, co wskazuje na znacznie większe wahania wydajności w czasie. Tbb i old_omp plasują się w środku stawki, z wynikami na poziomie 0,06-0,07, przy czym old_omp wykazuje więcej wartości odstających, co może świadczyć o większej podatności na lokalne anomalie wydajnościowe.



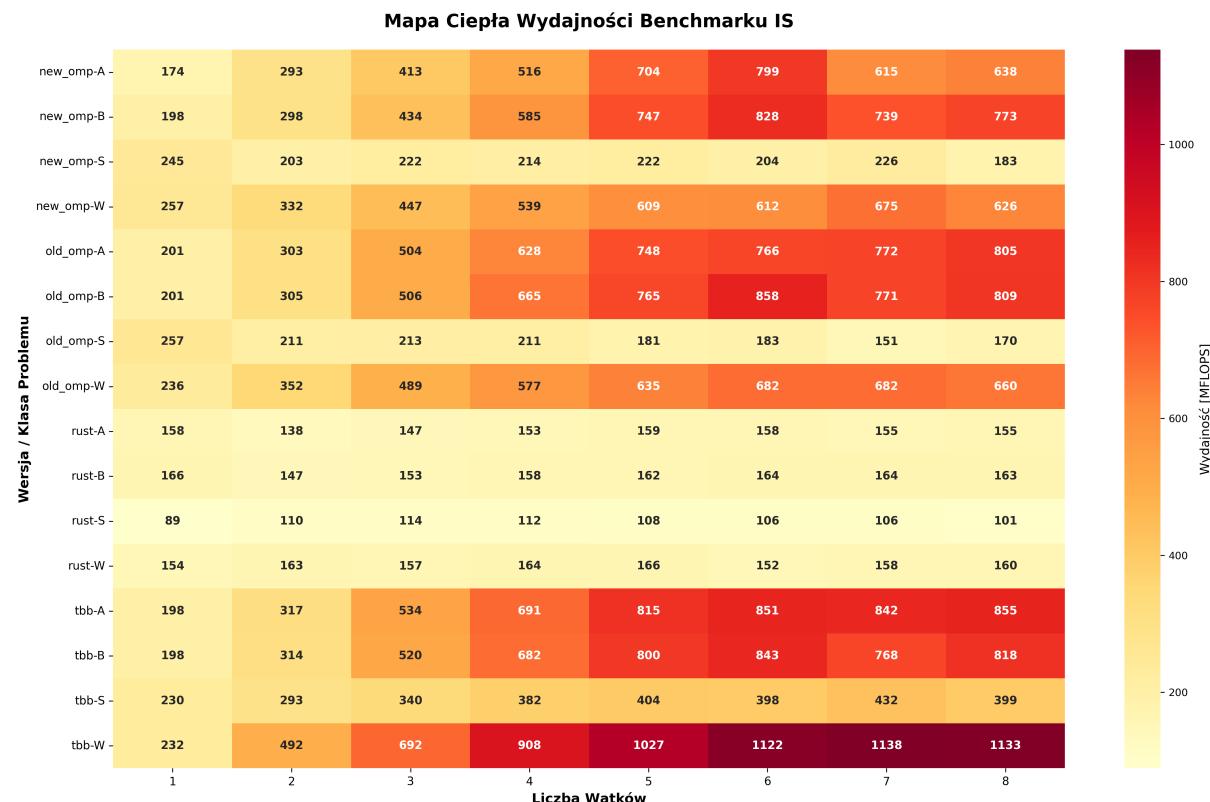
Rys. 9.43: Porównanie wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Na wykresie - rysunek 9.43 rzuca się w oczy wyraźna różnica w charakterystyce wydajnościowej implementacji Rust względem pozostałych rozwiązań. Podczas gdy implementacje tbb, old_omp i new_omp wykazują wyraźny wzrost wydajności wraz ze wzrostem liczby wątków, implementacja Rust utrzymuje niemal stały poziom - około 150-160 MFLOPS w klasach A i B - niezależnie od stopnia zrównoleglenia.

W całej analizie dominuje implementacja tbb, która osiąga najwyższe wartości wydajności we wszystkich klasach problemu, szczególnie w klasie W, gdzie przewaga nad rozwiązaniami opartymi na OpenMP sięga kilkuset MFLOPS. Wydajność tbb wzrasta stabilnie do około 5-6 wątków, po czym osiąga linię prostą lub delikatnie spada, co jest typowym zjawiskiem przy nasyceniu zasobów systemowych.

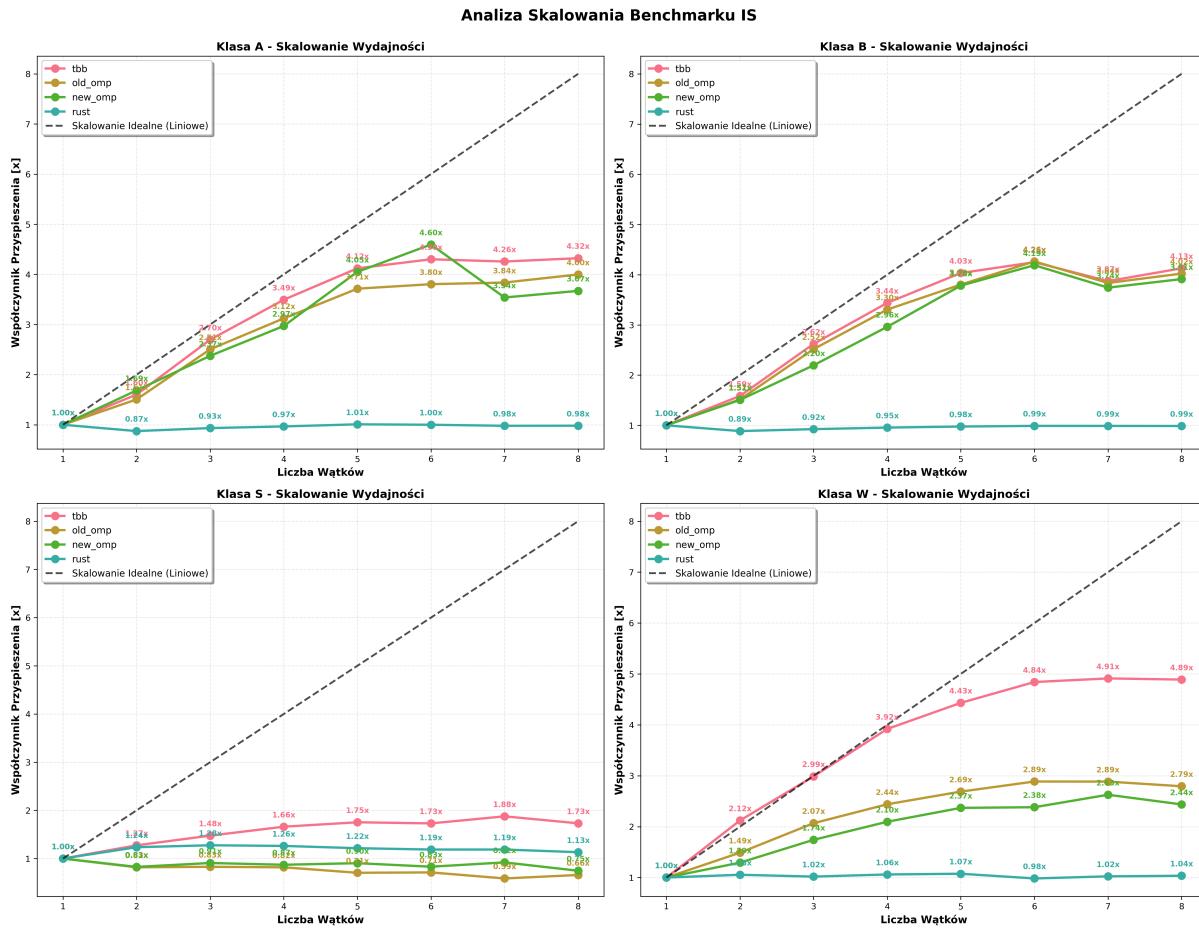
Klasy problemowe różnią się nie tylko poziomem bezwzględnej wydajności, lecz także charakterem skalowania. Klasy A i B zachowują się podobnie - osiągają wysoką wydajność i

wykazują regularne skalowanie. Klasa S prezentuje niższe wartości i bardziej nieregularny przebieg, natomiast klasa W cechuje się najwyższymi szczytowymi wynikami, ale też największym zróżnicowaniem pomiędzy implementacjami.



Rys. 9.44: Mapa ciepła wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Mapa ciepła - rysunek 9.50 stanowi syntetyczne podsumowanie analizowanych danych. Najwyższe wartości wydajności skupiają się wokół implementacji tbb, szczególnie w klasie W i przy większej liczbie wątków. Z kolei implementacja Rust pozostaje na jednolitym, niskim poziomie niezależnie od klasy problemu czy liczby wątków. Klasa S wyraźnie odstaje od pozostałych pod względem niskiej wydajności, a dla większości implementacji najwyższe wartości osiągane są w zakresie 6-8 wątków, co potwierdza wnioski płynące z analizy skalowania.

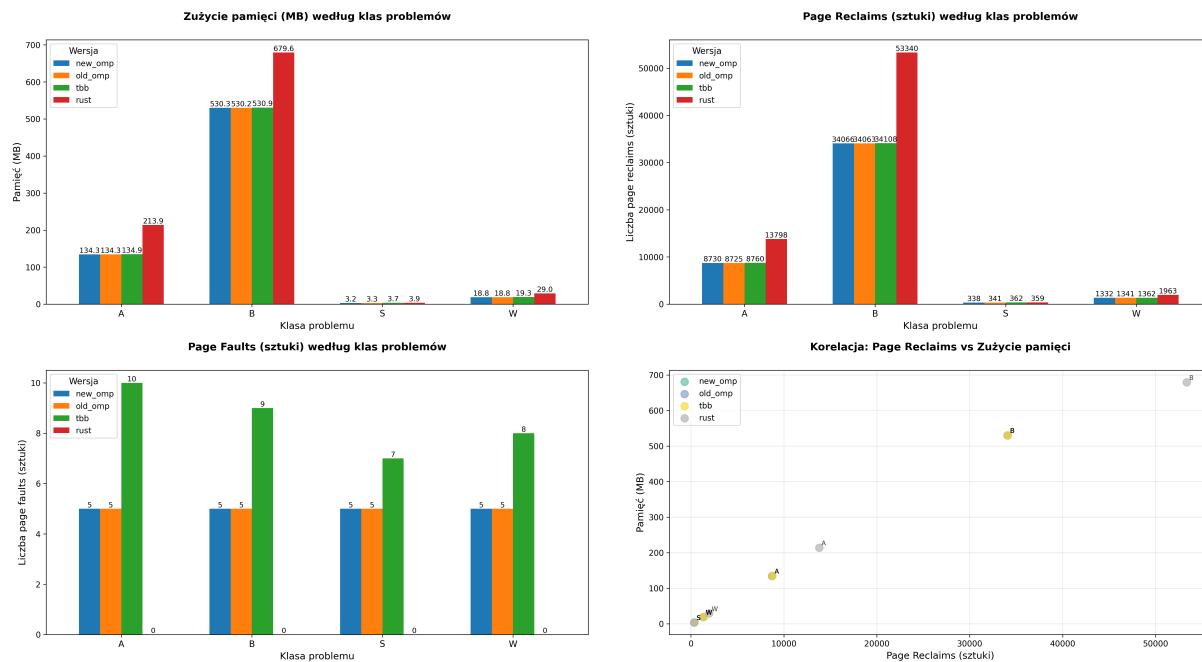


Rys. 9.45: Analiza skalowania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Wszystkie analizowane implementacje wykazują odchylenie od idealnego skalowania liniowego. Nawet najlepszy wynik - przyspieszenie rzędu 4,8x dla implementacji tbb w klasie W przy 6-8 wątkach - stanowi zaledwie około 60% teoretycznego maksimum. Spośród wszystkich badanych rozwiązań to właśnie tbb osiąga najefektywniejsze skalowanie we wszystkich klasach, szczególnie w klasie W, gdzie zdecydowanie dominuje nad konkurencją. Implementacje OpenMP (old_omp i new_omp) prezentują umiarkowane przyspieszenia, rzędu 3,8-4,3x w większych klasach problemowych (A i B), natomiast Rust praktycznie nie skaluje się wcale - współczynnik przyspieszenia oscyluje wokół 1, niezależnie od liczby wątków. Skalowanie silnie zależy również od klasy problemu. Klasa S charakteryzuje się najbardziej efektywnym, choć wciąż dalekim od idealnego, wykorzystaniem równoległości (do około 4,6x). Klasa W wypada najsłabiej, nie przekraczając przyspieszenia 2x, co wynika z małej skali problemu niedostosowanej do architektury wielowątkowej. W klasie W obserwujemy najwyższe zróżnicowanie między implementacjami, przy czym tbb wyraźnie się wyróżnia. Dla większości implementacji punkt nasycenia wydajności przypadaje na 5-6 wątków, po czym następuje stabilizacja lub lekki spadek. Wskazuje to na osiągnięcie limitów przepustowości pamięci lub narzutów związanych z synchronizacją w środowisku wielowątkowym.

9.3.3. Wyniki profilowania wydajności - platforma ARM64

Aby lepiej zrozumieć charakterystyki pamięciowe testowanych implementacji benchmarku IS, przeprowadzono analizę zużycia pamięci, błędów stron pamięci oraz mechanizmu ich odzyskiwania. Wnioski wyciągnięto na podstawie trzech grup wykresów: bezwzględnych wartości (rys. 9.46), porównania względnego względem old_omp (rys. 9.47) oraz kompromisów między metrykami (rys. 9.48).



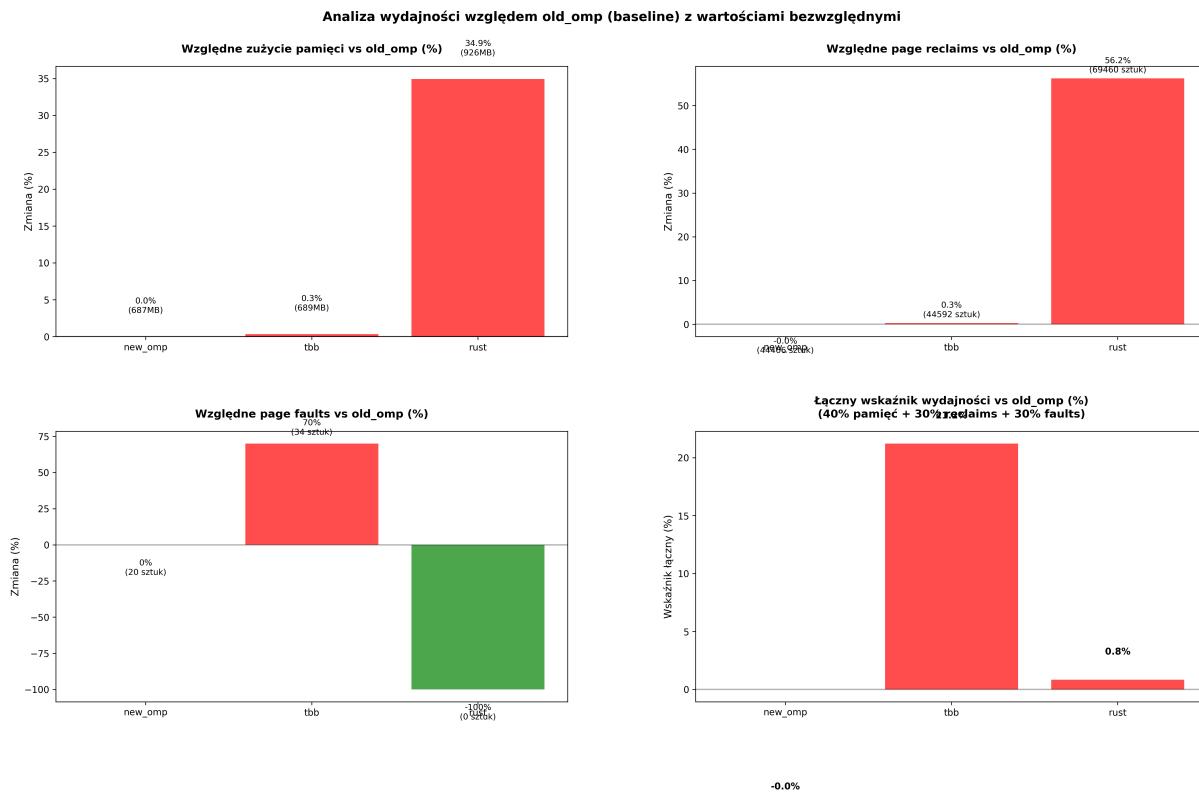
Rys. 9.46: Profilowanie wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

Zużycie pamięci i błędy stron

Wykresy w górnym rzędzie przedstawiają bezwzględne zużycie pamięci oraz liczbę odzyskanych stron pamięci:

- Największe zużycie pamięci odnotowano dla implementacji rust, osiągając 213,9 MB (klasa A) oraz 679,6 MB (klasa B). W pozostałych implementacjach (new_omp, old_omp, tbb) wartości te były niemal identyczne (np. 134 MB w klasie A i 530 MB w klasie B).
- Analogicznie, rust odzyskuje najwięcej stron, osiągając ponad 53 tysiące operacji w klasie B, co jest o ponad 50% więcej niż w pozostałych wersjach. Sugeruje to intensywniejsze wykorzystanie dynamicznego zarządzania pamięcią lub częstsze zwalnianie obszarów.
- W zakresie błędów stron, rust jako jedyna implementacja nie generuje żadnych błędów stron (0 sztuk we wszystkich klasach), co potwierdza jej deterministyczne podejście do alokacji pamięci.
- Wersje new_omp i old_omp utrzymują stabilny poziom błędów (5 sztuk we wszystkich klasach), natomiast tbb wykazuje wyraźnie wyższy poziom błędów - od 7 do 10 sztuk.

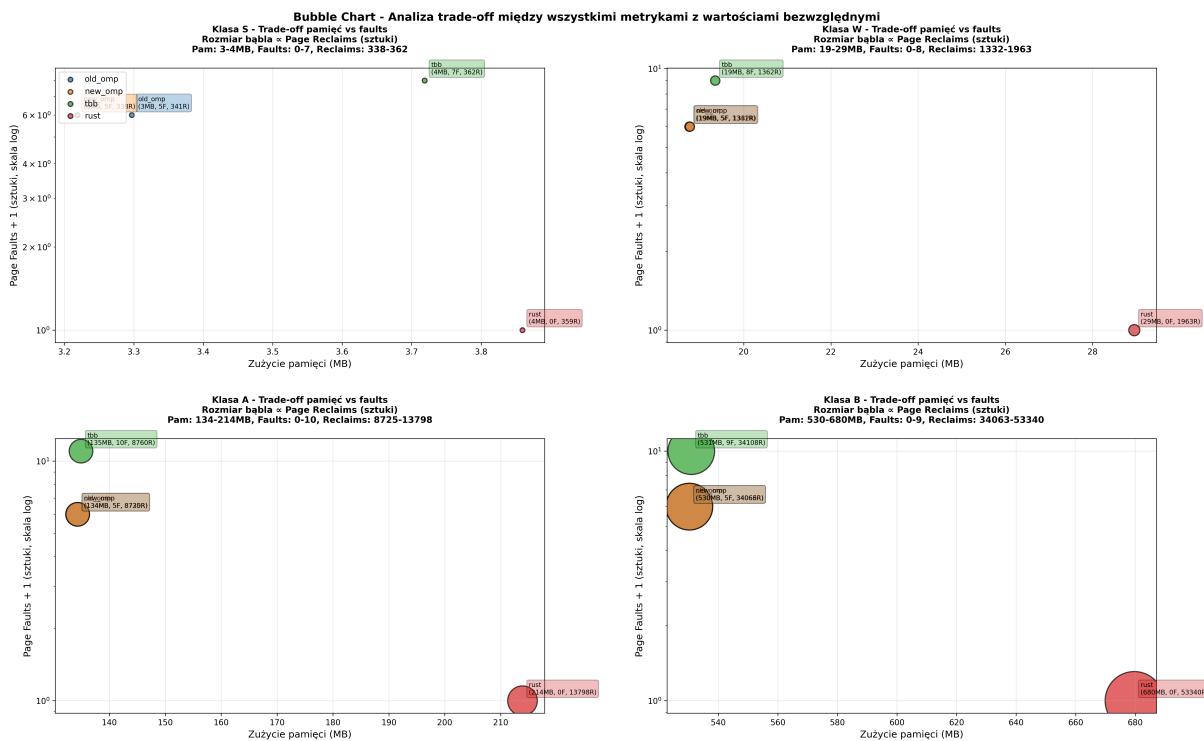
W prawym dolnym wykresie zaprezentowano korelację między zużyciem pamięci a liczbą page reclaims. Wykres ujawnia wyraźną korelację dodatnią - implementacje i klasy, które zużywają więcej pamięci, zwalniają również więcej stron z pamięcią, co wynika z konieczności intensywniejszej obsługi zarządzania pamięcią operacyjną.



Rys. 9.47: Analiza wydajności względem `old_omp` (punkt odniesienia) z wartościami bezwzględnymi

Wykres ten - rysunek 9.47 przedstawia zmiany procentowe trzech kluczowych metryk względem wersji odniesienia (`old_omp`):

- Zużycie pamięci: `new_omp` nie różni się w ogóle od wersji odniesienia (0%), `tbb` wykazuje jedynie symboliczny wzrost (0,3%), natomiast `rust` zużywa aż 34,9% więcej pamięci.
- Odzyskiwanie stron pamięci: `rust` generuje aż 56,2% więcej operacji odzyskania niż `old_omp`, co stanowi znaczące obciążenie podsystemu pamięci.
- Błędy stron: `rust` jako jedyna implementacja całkowicie je eliminuje (-100% względem `old_omp`), co jest jej największym atutem oraz potwierdza założenia co do mechanizmów języka.
- Wskaźnik zbiorczy (ważony: 40% pamięć + 30% claims + 30% faults) wskazuje, że jedynie `tbb` osiąga nieznaczną przewagę względem wersji bazowej (+0,8%), natomiast `rust` wypada niekorzystnie pomimo doskonałej obsługi błędów, głównie przez nadmierne zużycie pamięci.

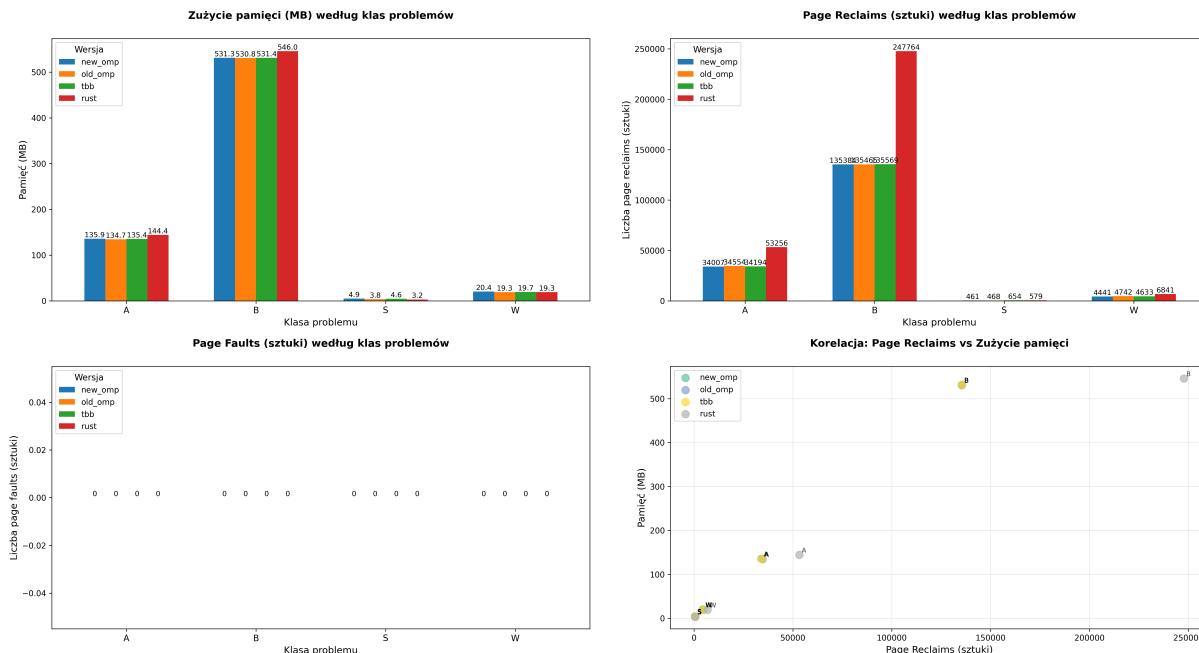


Rys. 9.48: Kompromisy (ang. *trade-off*) pomiędzy zużyciem pamięci a błędami stron pamięci, z uwzględnieniem liczby odzyskanych stron jako trzeciej zmiennej reprezentowanej przez rozmiar bąbla

Na podstawie wykresu bąbelkowego - rysunek 9.48 można zauważać:

- rust w każdej klasie lokuje się w dolnym rejonie wykresu (niska liczba błędów) przy wysokim zużyciu pamięci oraz największych bąblach (najwięcej zwolnień stron).
- tbb regularnie generuje najwyższą liczbę błędów stron przy zbliżonym zużyciu pamięci jak old_omp i new_omp.
- new_omp uzyskuje relatywnie zrównoważony kompromis - umiarkowane zużycie pamięci, średnia liczba błędów stron i średnia liczba odzyskanych stron.

9.3.4. Wyniki profilowania wydajności - platforma x86_64



Rys. 9.49: Profilowanie wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków

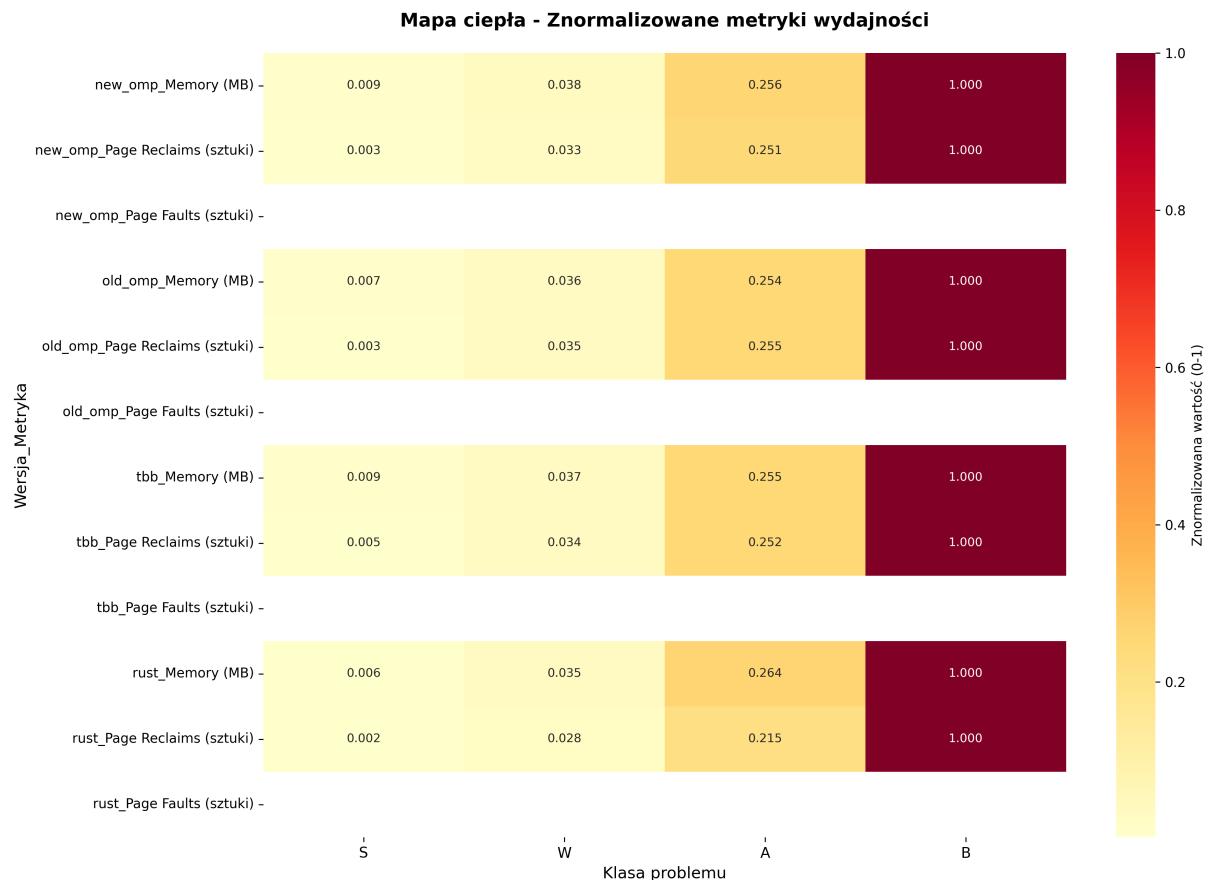
Analiza wykresów dotyczących zużycia pamięci - rysunek 9.49 ujawnia wyraźne różnice w zapotrzebowaniu na zasoby w zależności od klasy problemu, przy jednoczesnym niewielkim zróżnicowaniu pomiędzy poszczególnymi implementacjami. Największe zużycie pamięci zaobserwowano dla klasy B, co jest bezpośrednio związane z największym rozmiarem sortowanych danych. W tej klasie implementacja w języku Rust wyróżnia się nieznacznie wyższym zużyciem pamięci (546 MB) w porównaniu do pozostałych (531-533 MB). Klasa A wykazuje umiarkowane zapotrzebowanie na pamięć, mieszczące się w zakresie 135-144 MB, z ponownym wskazaniem na implementację Rust jako najbardziej zasobozerną (144,4 MB). Dla klas S i W, ze względu na mniejszy rozmiar problemu, zużycie pamięci jest znaczco niższe i wynosi odpowiednio 3,2-4,9 MB oraz 19,3-20,4 MB. Co interesujące, w przypadku klasy S to właśnie implementacja Rust osiąga najniższe zużycie pamięci (3,2 MB).

Wykresy przedstawiające operacje pamięci wirtualnej (zwolnienia oraz błędy stron) - 9.49 dostarczają informacji o efektywności zarządzania pamięcią. Szczególnie widoczna jest duża liczba zwolnień stron pamięci w klasie B, gdzie implementacja Rust osiąga wartość 247 764, znacznie przewyższając inne implementacje oscylujące wokół 135 000-136 000. Podobna tendencja występuje w klasie A - Rust generuje 53 256 zwolnień stron, podczas gdy pozostałe implementacje utrzymują się na poziomie 34 000-35 000. W klasach S i W liczby te są proporcjonalnie mniejsze, co odpowiada ich ograniczonym wymaganiom pamięciowym.

Z kolei brak błędów stron we wszystkich implementacjach i klasach problemu jest jednoznacznym dowodem na skuteczne zarządzanie pamięcią przez system operacyjny. Brak konieczności odwołań do pamięci wymiany oznacza, że całość operacji wykonywana była w pamięci fizycznej, bez negatywnego wpływu na wydajność.

Wykres korelowy między liczbą zwolnień stron a zużyciem pamięci wskazuje na silną zależność między tymi dwiema metrykami. Dane tworzą wyraźne grupy odpowiadające klasom problemu - od klasy B z najwyższym zużyciem pamięci, po klasę S z najniższym. W ramach każdej grupy implementacja Rust wykazuje tendencję do generowania większej liczby reklamacji stron przy podobnym zużyciu pamięci, co może świadczyć o jej specyficznym podejściu do

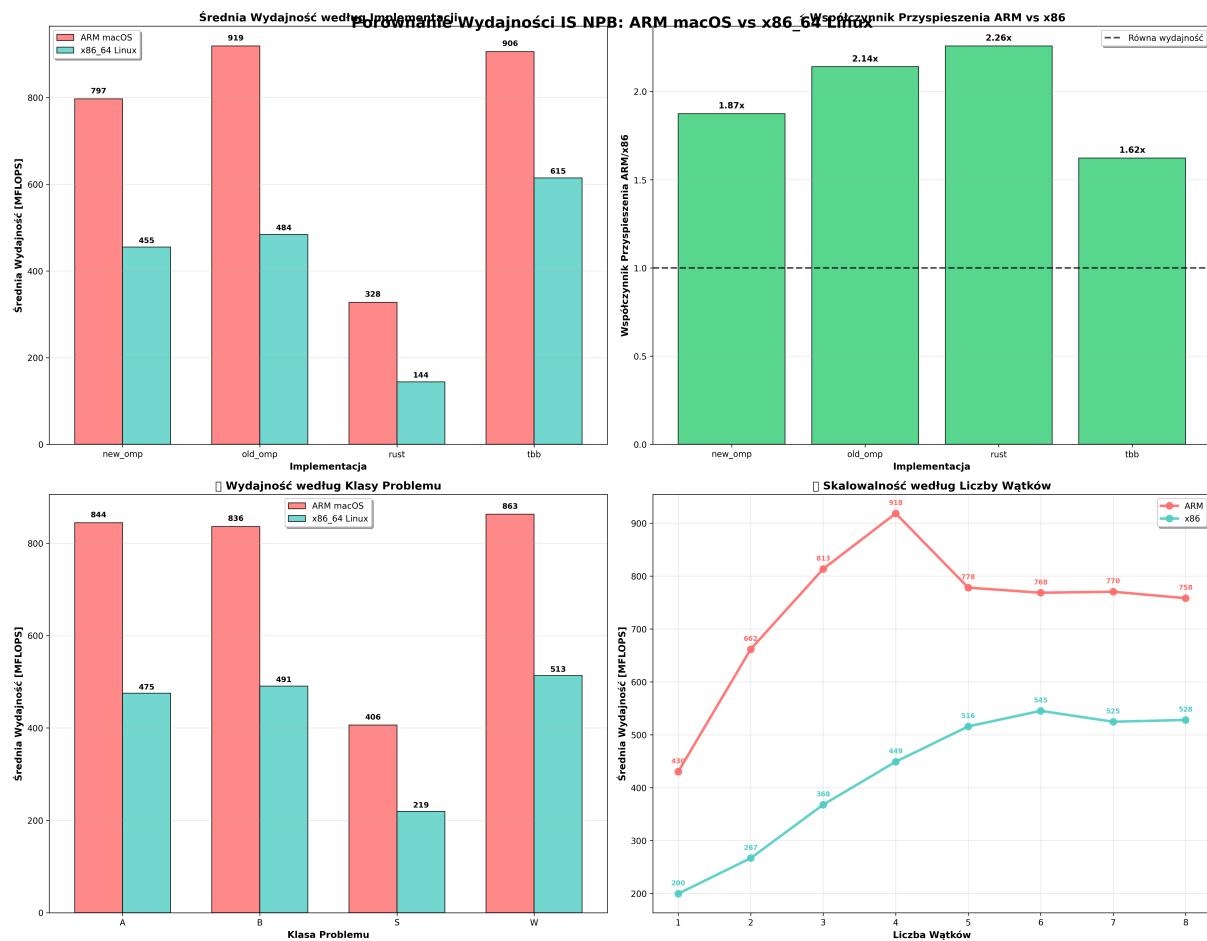
alokacji i zwalniania pamięci - bardziej intensywnym, lecz potencjalnie korzystnym dla innych aspektów wydajności.



Rys. 9.50

Znormalizowana mapa ciepła metryk wydajności - rysunek 9.50 potwierdza powyższe obserwacje, ukazując proporcjonalne różnice między klasami problemu i implementacjami. Wzorzec ten nie tylko podkreśla wpływ rozmiaru problemu na charakterystyki pamięciowe, ale również zwraca uwagę na unikalne właściwości implementacji Rust, której strategia zarządzania pamięcią istotnie różni się od pozostałych rozwiązań.

9.3.5. Porównanie pomiędzy platformami



Rys. 9.51: Porównanie średniej wydajności benchmarku IS dla platform ARM64 i x86_64

Analiza średniej wydajności według implementacji

Górny lewy wykres drugiego zestawu - rysunek 9.51 prezentuje średnią wydajność dla różnych implementacji algorytmów. We wszystkich badanych przypadkach (new_omp, old_omp, rust, tbb) architektura ARM macOS osiąga znacznie wyższe wartości MFLOPS niż architektura x86_64 Linux. Szczególnie wyraźna przewaga ARM występuje w implementacjach old_omp (919 vs 484 MFLOPS) oraz tbb (906 vs 615 MFLOPS).

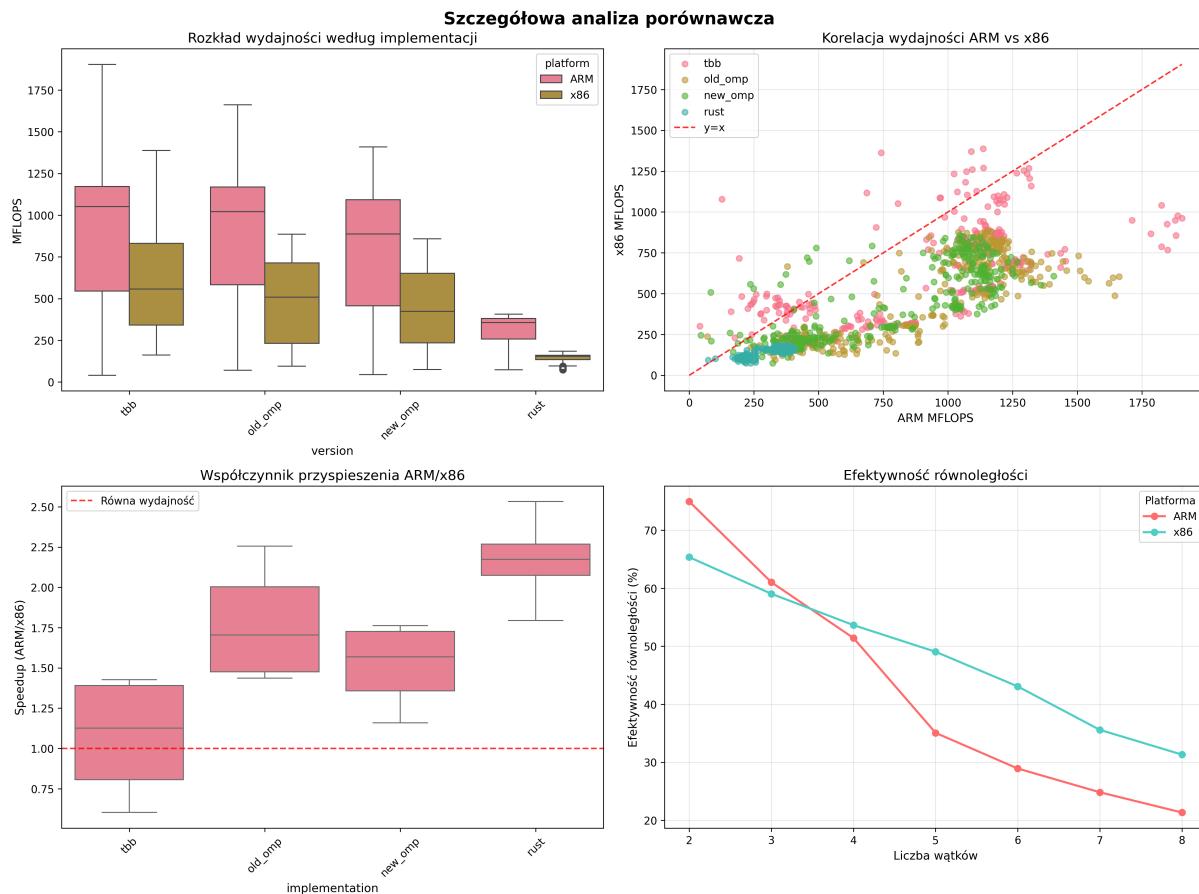
Współczynnik przyspieszenia widoczny w prawym górnym wykresie - 9.51 potwierdza tę przewagę, wskazując że implementacja w języku Rust osiąga najwyższy współczynnik przyspieszenia (2,34x), a tuż za nią plasuje się implementacja tbb (2,26x). Wszystkie badane implementacje wykazują wartości współczynnika przyspieszenia powyżej 1,0, co potwierdza systematyczną przewagę wydajnościową platformy ARM.

Analiza wydajności według klasy problemu i skalowalności

Lewy dolny wykres drugiego zestawu - rysunek 9.51 ilustruje, że przewaga wydajnościowa ARM macOS utrzymuje się konsekwentnie we wszystkich klasach problemów (A, B, C oraz W). Warto zauważyć, że różnica wydajnościowa jest proporcjonalna do złożoności problemu.

Analiza skalowalności według liczby wątków (prawy dolny wykres) pokazuje, że obie platformy wykazują wzrost wydajności wraz ze zwiększeniem liczby wątków do około 4-5, po czym

następuje stabilizacja lub lekki spadek. ARM macOS konsekwentnie utrzymuje wyższą bezwzględną wydajność, przy czym najwyższa wartość przypada na 4 wątki (913 MFLOPS dla ARM vs 518 MFLOPS dla x86_64).



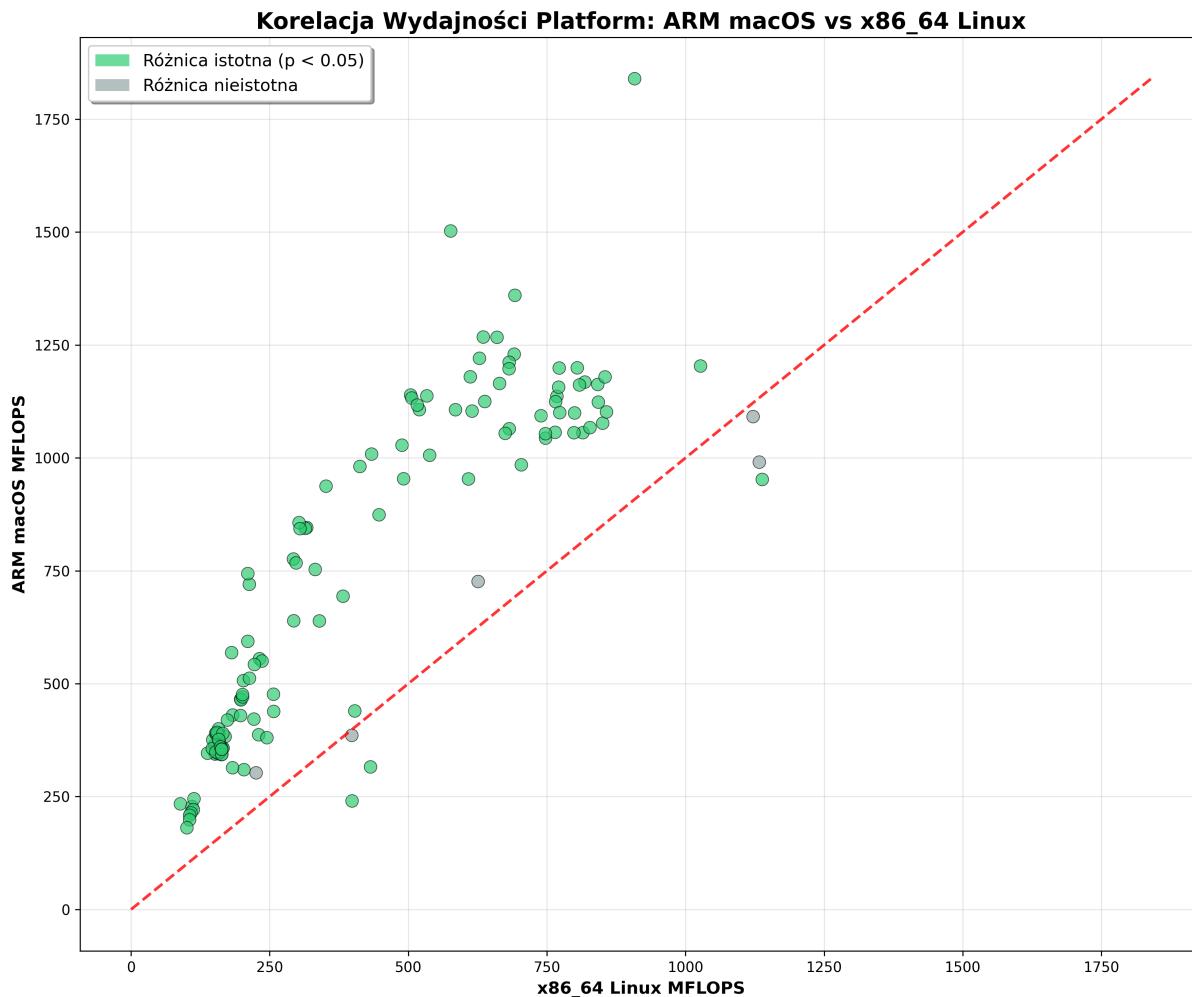
Rys. 9.52: Szczegółowa analiza wydajności benchmarku IS dla platform ARM64 i x86_64

Wykresy pudełkowe - rysunek 9.52 potwierdzają, że mediana wydajności dla platformy ARM jest systematycznie wyższa niż dla x86_64 we wszystkich implementacjach. Jednocześnie platforma ARM charakteryzuje się większym rozrzutem wyników, co sugeruje większą zmienność wydajności.

Wykres korelacji wydajności ARM vs x86 z kodowaniem kolorystycznym różnych implementacji dodatkowo potwierdza, że większość punktów pomiarowych znajduje się powyżej linii równej wydajności, przy czym różne implementacje grupują się w odmiennych obszarach wydajnościowych.

Analiza współczynnika przyspieszenia wskazuje, że implementacja Rust osiąga najwyższy medianowy współczynnik przyspieszenia (około 2,2x), natomiast implementacja tbb wykazuje największą zmienność, z niektórymi przypadkami osiągającymi wartości poniżej 1,0.

Ostatni wykres przedstawia efektywność równoległości w zależności od liczby wątków. Architektura ARM rozpoczyna z wyższą efektywnością przy małej liczbie wątków, jednak doświadcza szybszego spadku efektywności wraz ze wzrostem liczby wątków. Przy 8 wątkach obie platformy osiągają efektywność około 30%, przy czym x86_64 wypada nieznacznie lepiej, co wskazuje na lepsze zachowanie skalowalności przy wyższej liczbie wątków.



Rys. 9.53: Analiza istotności statystycznej benchmarku IS dla platform ARM64 i x86_64

Przedstawiony na wykresie rozkład punktów obrazuje korelację między wydajnością (mierzoną w MFLOPS - miliony operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę) - rysunek 9.52 na platformie ARM macOS względem x86_64 Linux. Punkty oznaczone kolorem zielonym wskazują na statystycznie istotne różnice ($p < 0,05$), natomiast punkty szare reprezentują różnice nieistotne statystycznie. Czerwona przerywana linia reprezentuje teoretyczną równą wydajność obu platform ($y=x$). Zdecydowana większość punktów znajduje się powyżej tej linii, co jednoznacznie wskazuje na przewagę wydajnościową architektury ARM macOS nad x86_64 Linux w badanych przypadkach.

Rozdział 10

Wnioski oraz rekomendacje

Przeprowadzone badanie ujawniło fundamentalne ograniczenie narzędzia hwloc-ps na platformie macOS, szczególnie w architekturze Apple Silicon, wynikające z celowych restrykcji systemowych w jądrze XNU. Jak wykazano w [3], brak implementacji interfejsów sched_setaffinity()/sched_getaffinity() uniemożliwia odczyt i kontrolę przypisań procesów do rdzeni (process-to-core binding), co stanowi istotną barierę metodologiczną w porównawczych badaniach wydajnościowych między architekturami ARM (M1) i x86_64. W odróżnieniu od pełnej funkcjonalności hwloc-ps w systemie Linux [6], gdzie narzędzie precyzyjnie raportuje przypisania wątków, na macOS możliwe jest jedynie wykrywanie topologii sprzętowej przez lstopo - przy użyciu mechanizmów sysctl. Ograniczenie to, uniemożliwiło bezpośrednią weryfikację wpływu przypisań wątków (thread pinning) na wydajność implementacji współbieżnych w językach Rust/C++.

W trakcie prac nad implementacją aplikacji w języku C++ z wykorzystaniem biblioteki Threading Building Blocks (TBB) zaobserwowano istotne różnice w procesie budowania i konfiguracji projektu pomiędzy platformami opartymi na architekturze x86-64 (Linux) a systemem macOS z procesorem Apple M1 (ARM64). Jest to również potwierdzone przez pracę [58]. Aplikacja, która kompilowała się bezproblemowo i działała optymalnie w środowisku x86, wymagała licznych modyfikacji przy próbie przeniesienia jej na platformę Apple Silicon. W szczególności konieczne było ręczne dostosowanie flag kompilatora, aktualizacja konfiguracji CMake z uwzględnieniem architektury ARM oraz zastosowanie społecznościowych latek w celu rozwiązania problemów z rozpoznawaniem architektury („Unknown architecture flag: -arch armv4t”). Te trudności potwierdzają, że proces przenoszenia aplikacji opartych na TBB na macOS z procesorem M1 nie jest trywialny i wymaga świadomego podejścia projektowego oraz głębszego zrozumienia różnic międzyplatformowych — zarówno na poziomie sprzętowym, jak i systemowym. Dodatkowo są też prace, które pokazują, że testy na maszynie wirtualnej z emulacją Intel wykazały spadek wydajności w porównaniu z natywnym wykonaniem na M1 [29].

The option of developing new computer languages may be the cleanest and most efficient way to provide support for parallel processing. However, practical issues make the wide acceptance of a new computer language close to impossible. Nobody likes to rewrite old code to new languages. It is difficult to justify such effort in most cases. Also, educating and convincing a large enough group of developers to make a new language gain critical mass is an extremely difficult task.

Rozdział 11

Podsumowanie

W trakcie realizacji pracy udało się osiągnąć zrealizować wszystkie postawione cele, którym było stworzenie aplikacji umożliwiającej wizualizację zmian w populacji dla różnych wariantów algorytmu genetycznego. W ramach projektu udało się skutecznie zaimplementować interaktywne narzędzie, umożliwiające śledzenie dynamiki ewolucji populacji w czasie rzeczywistym. Wykonanie tego zadania nie obyło się jednak bez wyzwań implementacyjnych. Jednym z głównych problemów był wstępny brak używania konstruktora kopującego, co wprowadziło nieścisłości podczas analizy wyników. Dodatkowo literatury, który reprezentowały selekcję rankingu znacząco się od siebie różniły, co wprowadzało pewne zamieszanie podczas interpretacji. Implementacja algorytmów genetycznych, różnych wariantów selekcji, krzyżowania i mutacji, wymagała skrupulatnego podejścia do detali oraz zoptymalizowania procesów obliczeniowych. Podczas pracy nad projektem jak i ich praktyczna implementacja pozwoliła na głębsze zrozumienie działania algorytmów genetycznych oraz ich zastosowań w dziedzinie optymalizacji. Praca ta stanowiła również doskonałą okazję do rozwinięcia umiejętności programistycznych, szczególnie w obszarze tworzenia interfejsu graficznego i manipulacji danymi w czasie rzeczywistym.

W kontekście dalszego rozwoju projektu sugeruje się rozważenie dodania nowych wariantów parametrów algorytmów genetycznych (selekcja, krzyżowanie, mutacja), tak aby użytkownik miał możliwość porównania ich efektywności. Jeżeli chodzi zaś o architekturę projektu, to można by wydzielić komponenty, aby umożliwić w przyszłości wymianę biblioteki odpowiedzialnej za interfejs użytkownika. Pozwoli to na implementację zaawansowanych funkcji wizualizacyjnych, które mogą ułatwić zrozumienie procesu ewolucji populacji.

Podsumowując, praca na projektem aplikacji pozwoliła na pogłębienie wiedzy z zakresu algorytmów ewolucyjnych oraz rozwinięcie umiejętności programistycznych w języku Java. Praca ta stanowi dobrą podstawę do dalszych badań nad algorytmami genetycznymi i ich praktycznym zastosowaniem.

Spis rysunków

2.1. Różnice między wykonywaniem zadań współbieżnie a równolegle [24]	12
3.1. Kroki komplikacji w języku Rust	22
3.2. Kroki komplikacji w języku C++	22
4.1. Spektrum nieuustraszonej współbieżności [15]	29
9.1. Porównanie czasów wykonania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	81
9.2. Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	82
9.3. Porównanie wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	84
9.4. Mapa ciepła wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	85
9.5. Analiza skalowania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	86
9.6. Porównanie czasów wykonania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie x86_64	87
9.7. Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie x86_64	88
9.8. Porównanie wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	89
9.9. Mapa ciepła wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	90
9.10. Analiza skalowania benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	91
9.11. Profilowanie wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie ARM64	92
9.12. Analiza wydajności względem old_omp (punkt odniesienia) z wartościami bezwzględnymi na platformie ARM64	93
9.13. Kompromisy (ang. <i>trade-off</i>) pomiędzy zużyciem pamięci a błędami stron pamięci, z uwzględnieniem liczby odzyskanych stron jako trzeciej zmiennej reprezentowanej przez rozmiar bąbla na platformie ARM64	95
9.14. Profilowanie wydajności benchmarku CG dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków na platformie x86_64	96
9.15. Porównanie średniej wydajności benchmarku CG dla platform ARM64 i x86_64 . .	97
9.16. Szczegółowa analiza wydajności benchmarku CG dla platform ARM64 i x86_64 . .	99
9.17. Analiza istotności statystycznej benchmarku CG dla platform ARM64 i x86_64 . .	100
9.18. Porównanie czasów wykonania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	101
9.19. Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	102

9.20. Porównanie wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	103
9.21. Mapa ciepła wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	104
9.22. Analiza skalowania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	105
9.23. Porównanie czasów wykonania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	106
9.24. Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	106
9.25. Porównanie wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	107
9.26. Mapa ciepła wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	108
9.27. Analiza skalowania benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	109
9.28. Profilowanie wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	110
9.29. Analiza wydajności względem old_omp (punkt odniesienia) z wartościami bezwzględnymi	111
9.30. Kompromisy (ang. <i>trade-off</i>) pomiędzy zużyciem pamięci a błędami stron pamięci, z uwzględnieniem liczby odzyskanych stron jako trzeciej zmiennej reprezentowanej przez rozmiar bąbla	111
9.31. Profilowanie wydajności benchmarku EP dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	112
9.32.	113
9.33. Porównanie średniej wydajności benchmarku EP dla platform ARM64 i x86_64	115
9.34. Szczegółowa analiza wydajności benchmarku EP dla platform ARM64 i x86_64	116
9.35. Analiza istotności statystycznej benchmarku EP dla platform ARM64 i x86_64	117
9.36. Porównanie czasów wykonania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	118
9.37. Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	119
9.38. Porównanie wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	120
9.39. Mapa ciepła wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	122
9.40. Analiza skalowania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	123
9.41. Porównanie czasów wykonania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	124
9.42. Analiza zmienności czasów wykonania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	125
9.43. Porównanie wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	126
9.44. Mapa ciepła wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	127
9.45. Analiza skalowania benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	128

9.46. Profilowanie wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	129
9.47. Analiza wydajności względem old_omp (punkt odniesienia) z wartościami bezwzględnymi	130
9.48. Kompromisy (ang. <i>trade-off</i>) pomiędzy zużyciem pamięci a błędami stron pamięci, z uwzględnieniem liczby odzyskanych stron jako trzeciej zmiennej reprezentowanej przez rozmiar bąbla	131
9.49. Profilowanie wydajności benchmarku IS dla klas S, W, A, B względem liczby użytych wątków	132
9.50.	133
9.51. Porównanie średniej wydajności benchmarku IS dla platform ARM64 i x86_64 . .	134
9.52. Szczegółowa analiza wydajności benchmarku IS dla platform ARM64 i x86_64 . .	135
9.53. Analiza istotności statystycznej benchmarku IS dla platform ARM64 i x86_64 . .	136

Spis tabel

3.1. Kwerendy użyte w bazie Scopus ¹	18
3.2. Przebieg selekcji literatury (baza Scopus)	20
3.3. Kwerendy użyte w bazie Scopus ²	20
3.4. Przebieg selekcji literatury (baza Google Scholar)	20
7.1. Porównanie aspektów zarządzania i organizacji kodu w Rust i różnych stylach C++	77
7.2. Porównanie modelu alokacji i bezpieczeństwa pamięci w Rust i różnych stylach C++	78

Spis listingów

3.1.	Kwerenda wygenerowana przez AI	19
4.1.	Przykład mechanizmu borrow	29
4.2.	Inteligentny wskaźnik Box	30
4.3.	Inteligentny wskaźnik RC	30
4.4.	Inteligentny wskaźnik Arc	30
4.5.	Przykład użycia unsafe Rust	31
4.6.	Przykład użycia Tokio	32
4.7.	Przykład użycia kanałów Crossbeam	33
4.8.	Przykład użycia Actix	33
4.9.	Przykład tworzenia kanału	35
4.10.	Przykład z wieloma wątkami	35
4.11.	Zakończenie kanału	36
4.12.	Przykład użycia semafora	38
4.13.	Przykład użycia par_iter	39
4.14.	Przykład tworzenia wątku	40
4.15.	Przykład użycia Mutex	40
4.16.	Przykład użycia RwLock	41
4.17.	Przykład użycia Atomic	42
4.18.	Przykład użycia bariery	43
5.1.	Przykład użycia std::jthread	44
5.2.	Przykład komunikacji między wątkami	45
5.3.	Przykład użycia std::scoped_lock	45
5.4.	Przykład użycia std::latch oraz std::barrier	46
5.5.	Przykład użycia std::async	47
5.6.	Przykład użycia std::promise	47
5.7.	Przykład użycia std::packaged_task	48
5.8.	Przykład użycia OpenMP w C++	49
5.9.	Przykład użycia Intel TBB w C++	50
7.1.	Struktura kodu benchmarków w języku Rust	56
7.2.	Zarządzanie pamięcią w benchmarkach NPB w języku Rust	57
7.3.	Równoległość w benchmarkach NPB w języku Rust	58
7.4.	Implementacja benchmarku EP w języku Rust	59
7.5.	Implementacja benchmarku CG w języku Rust	60
7.6.	Implementacja benchmarku IS w języku Rust	63
7.7.	Struktura kodu benchmarków w języku C++ z OpenMP	65
7.8.	Zarządzanie pamięcią w benchmarkach C++ z OpenMP	66
7.9.	Mechanizmy równoległości w benchmarkach C++ z OpenMP	67
7.10.	Implementacja benchmarku EP w języku C++ z OpenMP	68
7.11.	Implementacja benchmarku CG w języku C++ z OpenMP	69
7.12.	Implementacja benchmarku IS w języku C++ z OpenMP	72

7.13. Implementacja TBB - struktura kodu	72
7.14. Implementacja TBB - równoległość	73
7.15. Implementacja nowoczesnego C++ - struktura kodu	74
7.16. Implementacja nowoczesnego C++ - zarządzanie pamięcią	75
7.17. Implementacja nowoczesnego C++ - równoległość	76

Bibliografia

- [1] C++ - Wikipedia — en.wikipedia.org. <https://en.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>. [Dostęp 16-03-2025].
- [2] Comparing Programming Languages — cs.ucf.edu. <https://www.cs.ucf.edu/~leavens/ComS541Fall198/hw-pages/comparing/>. [Dostęp 16-03-2025].
- [3] CPU binding on MacOS · Issue #555 · open-mpi/hwloc — github.com. <https://github.com/open-mpi/hwloc/issues/555>. [Dostęp 01-06-2025].
- [4] CUDA Toolkit - Free Tools and Training — developer.nvidia.com. <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>. [Dostęp 22-03-2025].
- [5] Execution control library (since C++26) - cppreference.com — en.cppreference.com. <https://en.cppreference.com/w/cpp/execution.html>. [Dostęp 31-05-2025].
- [6] Hardware Locality (hwloc): Hardware Locality — hwloc.readthedocs.io. <https://hwloc.readthedocs.io/en/stable/>. [Dostęp 01-06-2025].
- [7] How do you compare programming languages in a coding interview? — linkedin.com. <https://www.linkedin.com/advice/1/how-do-you-compare-programming-languages-coding>. [Dostęp 16-03-2025].
- [8] NAS Parallel Benchmarks — nas.nasa.gov. <https://www.nas.nasa.gov/software/npb.html>. [Accessed 17-04-2025].
- [9] Rust GPU — rust-gpu.github.io. <https://rust-gpu.github.io>. [Dostęp 22-03-2025].
- [10] Rust (programming language) - Wikipedia — en.wikipedia.org. [https://en.wikipedia.org/wiki/Rust_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rust_(programming_language)). [Dostęp 16-03-2025].
- [11] Safety: A comparaison between Rust, C++ and Go | Hacker News — news.ycombinator.com. <https://news.ycombinator.com/item?id=32285122>. [Dostęp 13-03-2025].
- [12] vulkano - Rust — docs.rs. <https://docs.rs/vulkano/0.12.0/vulkano/>. [Dostęp 22-03-2025].
- [13] wgpu: portable graphics library for Rust — wgpu.rs. <https://wgpu.rs>. [Dostęp 22-03-2025].
- [14] *Professional CUDA C Programming*. Wrox Press Ltd., GBR, wydanie 1st, 2014.
- [15] J. Abdi, G. Posluns, G. Zhang, B. Wang, M. C. Jeffrey. When is parallelism fearless and zero-cost with rust? *Proceedings of the 36th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures*, SPAA '24, strony 27–40, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [16] S. Ali, S. Qayyum. A pragmatic comparison of four different programming languages, 06 2021.

- [17] Z. Alomari, O. Halimi, K. Sivaprasad, C. Pandit. Comparative studies of six programming languages. 04 2015.
- [18] V. Astrauskas, C. Matheja, F. Poli, P. Müller, A. J. Summers. How do programmers use unsafe rust? *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 4(OOPSLA):1–27, 2020.
- [19] V. Besozzi. Ppl: Structured parallel programming meets rust. *2024 32nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP)*, strony 78–87, 2024.
- [20] G. L. Bessa, L. M. D. S. Borela, J. A. Soares. Npb-rust: Nas parallel benchmarks in rust. <https://github.com/glbessa/NPB-Rust>, 2025. Dostęp: 2025-05-18.
- [21] J. Blandy, J. Orendorff, L. Tindall. *Programming Rust*. O'Reilly Media, 2021.
- [22] K. Bobrov. *Grokking Concurrency*. Manning, 2024.
- [23] M. Bos. *Rust Atomics and Locks: Low-Level Concurrency in Practice*. O'Reilly Media, 2022.
- [24] ByteByteGo. EP108: How do we design a secure system? — blog.bytebytogo.com. https://blog.bytebytogo.com/p/ep108-how-do-we-design-a-secure-system?utm_campaign=post&utm_medium=web. [Dostęp 09-03-2025].
- [25] R. Chandra. *Parallel Programming in OpenMP*. High performance computing. Elsevier Science, 2001.
- [26] T.-C. Chen, M. Dezani-Ciancaglini, N. Yoshida. On the preciseness of subtyping in session types: 10 years later. *Proceedings of the 26th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming*, PPDP '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [27] M. Costanzo, E. Rucci, M. Naouf, A. De Giusti. Performance vs programming effort between rust and c on multicore architectures: Case study in n-body. *2021 XLVII Latin American Computing Conference (CLEI)*, strony 1–10. IEEE, 2021.
- [28] R. DeWolf. Introducing Rainbow: Compare the Performance of Different Programming Languages — medium.com. <https://medium.com/better-programming/introducing-rainbow-compare-the-performance-of-different-programming-languages-f08a67453cd4>. [Dostęp 16-03-2025].
- [29] J. Duke. Memory forensics comparison of apple m1 and intel architecture using volatility framework. Master's thesis, Louisiana State University, 2021.
- [30] Z. Fehervari. Rust vs C++: Modern Developers' Dilemma — bluebirdinternational.com. <https://bluebirdinternational.com/rust-vs-c/>. [Dostęp 28-01-2025].
- [31] K. R. Fulton, A. Chan, D. Votipka, M. Hicks, M. L. Mazurek. Benefits and drawbacks of adopting a secure programming language: Rust as a case study. *Seventeenth Symposium on Usable Privacy and Security (SOUPS 2021)*, strony 597–616, 2021.
- [32] M. Galvin. *Mastering Concurrency And Parallel Programming: Atain Advanced Techniques and Best Practices for Crafting Robust, Manitainable, and High-Performance Concurrent Code in C++*. 2024.
- [33] Y. Gusakov. C++ Vs. Rust: 6 Key Differences — QIT — qit.software. <https://qit.software/c-vs-rust-6-key-differences/>. [Dostęp 28-01-2025].

- [34] H. Heyman, L. Brandefelt. A comparison of performance & implementation complexity of multithreaded applications in rust, java and c++, 2020.
- [35] R. Innovation. Mastering Rust Concurrency & Parallelism: Ultimate Guide 2024 — rapidinnovation.io. <https://www.rapidinnovation.io/post/concurrent-and-parallel-programming-with-rust#2-basics-of-rust-for-concurrent-programming>. [Dostęp 23-12-2024].
- [36] R. Jung, J.-H. Jourdan, R. Krebbers, D. Dreyer. Safe systems programming in rust. *Communications of the ACM*, 64(4):144–152, 2021.
- [37] S. Klabnik, C. Nichols. *The Rust Programming Language*. No Starch Press, USA, 2018.
- [38] B. Köpcke, S. Gorlatch, M. Steuwer. Descend: A safe gpu systems programming language. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 8, 2024. Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access.
- [39] S. Lankes, J. Breitbart, S. Pickartz. Exploring rust for unikernel development. *Proceedings of the 10th Workshop on Programming Languages and Operating Systems*, strony 8–15, 2019.
- [40] P. Larsen. Migrating C to Rust for Memory Safety . *IEEE Security & Privacy*, 22(04):22–29, Lip. 2024.
- [41] K. Lesiński. Speed of rust vs c, 2019. Dostęp: 10-01-2025.
- [42] Y. Lin, S. M. Blackburn, A. L. Hosking, M. Norrish. Rust as a language for high performance gc implementation. *ACM SIGPLAN Notices*, 51(11):89–98, 2016.
- [43] M. Lindgren. Introduction - Comparing parallel Rust and C++ — parallel-rust-cpp.github.io. <https://parallel-rust-cpp.github.io>. [Dostęp 28-01-2025].
- [44] J. Löff, D. Griebler, G. Mencagli, G. Araujo, M. Torquati, M. Danelutto, L. G. Fernandes. The nas parallel benchmarks for evaluating c++ parallel programming frameworks on shared-memory architectures. *Future Generation Computer Systems*, 125:743–757, 2021.
- [45] E. M. Martins, L. G. Faé, R. B. Hoffmann, L. S. Bianchessi, D. Griebler. Npb-rust: Nas parallel benchmarks in rust, 2025.
- [46] M. Mitzenmacher, E. Upfal. *Probability and Computing: Randomization and Probabilistic Techniques in Algorithms and Data Analysis*. Cambridge University Press, 2017.
- [47] S. Nanz, F. Torshizi, M. Pedroni, B. Meyer. A comparative study of the usability of two object-oriented concurrent programming languages. *Information and Software Technology*, 55, 11 2010.
- [48] S. Nanz, F. Torshizi, M. Pedroni, B. Meyer. Design of an empirical study for comparing the usability of concurrent programming languages. *Information and Software Technology*, 55(7):1304–1315, 2013.
- [49] P. Pacheco. *An Introduction to Parallel Programming*. Morgan Kaufmann, 2011.
- [50] W. Paluszynski. Systemy Czasu Rzeczywistego i Sieci Komputerowe - Witold Paluszynski — kcir.pwr.edu.pl. <https://kcir.pwr.edu.pl/~witold/scrsk/#literatura>. [Dostęp 10-03-2025].
- [51] A. Pinho, L. Couto, J. Oliveira. Towards rust for critical systems. *2019 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*, strony 19–24. IEEE, 2019.

-
- [52] L. Rinaldi, M. Torquati, M. Danelutto. Enforcing reference capability in fastflow with rust. *Advances in Parallel Computing*, 36:396 – 405, 2020. Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access.
 - [53] M. P. Rooney, S. J. Matthews. Evaluating fft performance of the c and rust languages on raspberry pi platforms. *2023 57th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, strony 1–6, 2023.
 - [54] J. Sible, D. Svoboda. Rust software security: A current state assessment. Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute's Insights (blog), Dec 2022. [Dostęp: 2025-Mar-12].
 - [55] T. Silva, J. Bispo, T. Carvalho. Foundations for a rust-like borrow checker for c. strony 155 – 165, 2024. Cited by: 0; All Open Access, Hybrid Gold Open Access.
 - [56] H. Team. Rust vs C++: A Quick Guide for Developers | Hostwinds — hostwinds.com. <https://www.hostwinds.com/blog/rust-vs-c-a-quick-guide-for-developers>. [Dostęp 13-03-2025].
 - [57] B. Troutwine. *Hands-On Concurrency with Rust: Confidently build memory-safe, parallel, and efficient software in Rust*. Packt Publishing, 2018.
 - [58] A. Tuby, A. Morrison. Reverse engineering the apple m1 conditional branch predictor for out-of-place spectre mistraining, 2025.
 - [59] T. Vandervelden, R. De Smet, D. Deac, K. Steenhaut, A. Braeken. Overview of embedded rust operating systems and frameworks. *Sensors*, 24(17), 2024. Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access.
 - [60] R. Viitanen. Evaluating memory models for graph-like data structures in the rust programming language: Performance and usabiliy, 2020.
 - [61] V. Q. T. (vuquangtrong@gmail.com). Introduction to Parallel Programming in C++ with OpenMP - Stephan O'Brien — physics.mcgill.ca. <https://www.physics.mcgill.ca/~obriens/Tutorials/parallel-cpp/>. [Dostęp 23-12-2024].
 - [62] A. Williams. *C++ Concurrency in Action*. Manning, 2019.
 - [63] X. Yin, Z. Huang, S. Kan, G. Shen. Safemd: Ownership-based safe memory deallocation for c programs. *Electronics*, 13(21), 2024.
 - [64] Z. Yu, L. Song, Y. Zhang. Fearless concurrency? understanding concurrent programming safety in real-world rust software. *arXiv preprint arXiv:1902.01906*, 2019.