

Politechnika Warszawska

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI  
I TECHNIK INFORMACYJNYCH



Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

# Praca dyplomowa magisterska

na kierunku Informatyka  
w specjalności Inteligentne Systemy

Porównanie wydajności i możliwości współczesnych  
silników gier komputerowych

inż. Krzysztof Rudnicki

Numer albumu 307585

promotor  
dr inż. Michał Chwesiuk

WARSZAWA 2026



## Porównanie wydajności i możliwości współczesnych silników gier komputerowych

**Streszczenie.** Przez ostatnią dekadę rynek tworzenia gier komputerowych zdominowały dwa silniki: Unity oraz Unreal Engine. Niniejsza praca podejmuje się wyzwania przeprowadzenia analizy porównawczej obu tych silników pod kątem wydajności oraz procesu programowania gier. W tym celu wykorzystano narzędzie do profilowania NVIDIA Nsight, służące do oceny wydajności aplikacji graficznych, w szczególności do pomiaru czasu klatki, obciążenia GPU oraz efektywności renderowania. Przeprowadzono również wywiady środowiskowe z osobami związanymi profesjonalnie z tworzeniem gier na obu platformach, jak również opisano proces twórczy, napotkane trudności oraz przewagi każdego z silników. Na potrzeby pracy stworzono dwie gry w tym samym gatunku — *bullet hell* — słynącym z mnogości elementów na ekranie i efektów specjalnych, a jednocześnie będącym relatywnie łatwym do zaimplementowania. Jedna gra została stworzona w języku C# (Unity), druga w C++ (Unreal Engine). Następnie obie gry zostały poddane analizie w programie NVIDIA Nsight w celu oceny możliwości optymalizacji obu silników. Na podstawie wywiadów oraz analizy procesu twórczego scharakteryzowano również inne aspekty obu silników, takie jak próg wejścia, współpraca z systemami kontroli wersji oraz architektura silnika. Praca stara się wypełnić niszę w literaturze i badaniach związanych z oceną obu silników do gier.

**Słowa kluczowe:** Gry, Silniki do gier, C#, C++, Unreal Engine, Unity, Gry *bullet hell*, NVIDIA Nsight, Wydajność, Wywiady, Analiza porównawcza, Profilowanie, Renderowanie, Optymalizacja, Programowanie gier, Tworzenie gier, Czas klatki, Architektura silnika, Kontrola wersji, GPU

# Comparison of performance and capabilities of modern computer games engines

**Abstract.** Over the past decade, the video game development market has been dominated by two engines: Unity and Unreal Engine. This thesis undertakes the challenge of conducting a comparative analysis of both engines in terms of performance and game programming workflows. To this end, the profiling tool NVIDIA Nsight was utilized to evaluate the performance of graphics applications, particularly for measuring frame time, GPU load, and rendering efficiency. Expert interviews were also conducted with professionals involved in game development on both platforms, and the creative process, encountered difficulties, and advantages of each engine were described. For the purposes of this study, two games were developed in the same genre — *bullet hell* — known for its abundance of on-screen elements and special effects, while being relatively straightforward to implement. One game was created in C# (Unity), the other in C++ (Unreal Engine). Both games were then analyzed using NVIDIA Nsight to assess the optimization capabilities of both engines. Drawing from the interviews and analysis of the creative process, other aspects of both engines were also characterized, such as the learning curve, integration with version control systems, and engine architecture. This thesis aims to fill a gap in the literature and research concerning the evaluation of game engines.

**Keywords:** Games, Game engines, C#, C++, Unreal Engine, Unity, Bullet hell games, NVIDIA Nsight, Performance, Interviews, Comparative analysis, Profiling, Rendering, Optimization, Game programming, Game development, Frame time, Engine architecture, Version control, GPU

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	11
1.1. Motywacja i cel pracy	11
1.2. Zakres pracy	11
1.3. Wybór gry testowej – gatunek bullet hell	11
1.3.1. Charakterystyka gatunku	11
1.3.2. Uzasadnienie wyboru gatunku	12
1.3.3. Parametry gry testowej	13
1.4. Struktura pracy	13
1.5. Metodologia	14
<b>2. Przegląd literatury i istniejących rozwiązań</b>	15
2.1. Historia rozwoju silników gier	15
2.2. Klasyfikacja silników gier	15
2.2.1. Architektura silników według Gregory’ego	15
2.2.2. Silniki komercyjne vs. open source	16
2.2.3. Silniki specjalistyczne vs. uniwersalne	16
2.3. Aktualny stan badań	16
2.3.1. Badania wydajności	16
2.3.2. Metodologie porównawcze	16
2.3.3. Specjalizowane zastosowania	17
2.3.4. Badania społeczności i ekosystemu	17
2.4. Motywacja i cel pracy	17
2.5. Trendy technologiczne	17
<b>3. Charakterystyka współczesnych silników gier</b>	18
3.1. Kryteria wyboru silników do analizy	18
3.2. Unity	18
3.2.1. Wprowadzenie i historia	18
3.2.2. Możliwości i funkcjonalności	19
3.2.3. Narzędzia deweloperskie	19
3.3. Unreal Engine	19
3.3.1. Wprowadzenie i historia	19
3.3.2. Możliwości i funkcjonalności	20
3.3.3. Narzędzia deweloperskie	20
3.4. Porównanie architektoniczne	21
3.5. Uzasadnienie wyboru do badań	21
<b>4. Metodologia badań i kryteria porównania</b>	22
4.1. Założenia metodologiczne	22
4.1.1. Cel badań	22
4.1.2. Hipotezy badawcze	22
4.2. Kryteria porównania	22
4.2.1. Wydajność	22

4.2.2.	Funkcjonalność . . . . .	22
4.2.3.	Użyteczność . . . . .	22
4.3.	Środowisko testowe . . . . .	22
4.3.1.	Specyfikacja sprzętowa . . . . .	22
4.3.2.	Specyfikacja oprogramowania . . . . .	23
4.3.3.	Konfiguracja testowa . . . . .	23
4.4.	Projekt testów . . . . .	23
4.4.1.	Gra testowa typu <i>bullet hell</i> . . . . .	23
4.4.2.	Fazy obciążenia . . . . .	24
4.4.3.	Metryki i wskaźniki . . . . .	24
4.4.4.	Procedura zbierania danych . . . . .	24
<b>5.</b>	<b>Analiza wywiadów z deweloperami gier . . . . .</b>	<b>26</b>
5.1.	Charakterystyka respondentów . . . . .	26
5.2.	Motywy wyboru silnika . . . . .	26
5.2.1.	Przystępność i próg wejścia . . . . .	26
5.2.2.	Język programowania . . . . .	27
5.2.3.	Wymagania projektu . . . . .	27
5.3.	Dokumentacja i materiały edukacyjne . . . . .	27
5.3.1.	Oficjalna dokumentacja . . . . .	27
5.3.2.	Nieoficjalne poradniki . . . . .	28
5.3.3.	Jakość dydaktyczna poradników . . . . .	28
5.4.	Architektura i wzorce projektowe . . . . .	28
5.4.1.	System komponentowy Unity . . . . .	28
5.4.2.	Struktura Unreal Engine . . . . .	29
5.4.3.	Specjalizacja silników . . . . .	29
5.5.	Kompilacja i przepływ pracy . . . . .	29
5.5.1.	Czas kompilacji . . . . .	29
5.5.2.	Stabilność środowiska . . . . .	29
5.5.3.	Kompatybilność wsteczna . . . . .	30
5.6.	Kontrola wersji i współpraca zespołowa . . . . .	30
5.6.1.	Integracja z Git . . . . .	30
5.6.2.	Mergowanie konfliktów . . . . .	30
5.7.	Współpraca z osobami nietechnicznymi . . . . .	31
5.7.1.	System Blueprints . . . . .	31
5.7.2.	Narzędzia dla artystów . . . . .	31
5.8.	Asset Store i zasoby zewnętrzne . . . . .	31
5.8.1.	Dostępność i jakość assetów . . . . .	31
5.8.2.	Zastosowanie assetów . . . . .	31
5.9.	Wykorzystanie sztucznej inteligencji . . . . .	32
5.9.1.	Doświadczenia z LLM . . . . .	32
5.9.2.	Generowanie grafik . . . . .	32
5.10.	Optymalizacja i wydajność . . . . .	32

5.10.1.	Narzut silników . . . . .	32
5.10.2.	Blueprinty vs C++ . . . . .	32
5.10.3.	Garbage Collector . . . . .	32
5.11.	Przyszłość silników i oczekiwania deweloperów . . . . .	33
5.11.1.	Entity Component System (ECS) . . . . .	33
5.11.2.	UI Toolkit . . . . .	33
5.11.3.	Konkurencja Godot . . . . .	33
5.12.	Podsumowanie wyników badań jakościowych . . . . .	33
5.12.1.	Silne strony Unity . . . . .	33
5.12.2.	Silne strony Unreal Engine . . . . .	33
5.12.3.	Obszary problemowe wspólne . . . . .	34
5.12.4.	Rekomendacje z badań . . . . .	34
<b>6.</b>	<b>Doświadczenia z implementacji gry testowej . . . . .</b>	<b>35</b>
6.1.	Opis projektu testowego . . . . .	35
6.2.	Implementacja w Unity . . . . .	35
6.2.1.	Środowisko i konfiguracja projektu . . . . .	35
6.2.2.	Architektura systemu . . . . .	35
6.2.3.	System spawnu przeciwników . . . . .	36
6.2.4.	Wyzwania napotkane w Unity . . . . .	36
6.2.5.	Pozytywne aspekty Unity . . . . .	37
6.3.	Implementacja w Unreal Engine . . . . .	37
6.3.1.	Środowisko i konfiguracja projektu . . . . .	37
6.3.2.	Podejście do grafiki 2D . . . . .	37
6.3.3.	System Blueprintów vs C++ . . . . .	37
6.3.4.	Object Pooling w Unreal . . . . .	38
6.3.5.	Wyzwania napotkane w Unreal . . . . .	38
6.3.6.	Pozytywne aspekty Unreal . . . . .	38
6.4.	Porównanie doświadczeń implementacyjnych . . . . .	38
6.5.	Wnioski z implementacji . . . . .	38
<b>7.</b>	<b>Narzędzia profilowania wydajności . . . . .</b>	<b>40</b>
7.1.	Wbudowane narzędzia diagnostyczne silników . . . . .	40
7.1.1.	Unity Profiler . . . . .	40
7.1.2.	Unreal Insights . . . . .	40
7.1.3.	Ograniczenia narzędzi wbudowanych . . . . .	41
7.2.	NVIDIA Nsight Graphics . . . . .	41
7.2.1.	Uzasadnienie wyboru . . . . .	41
7.2.2.	Możliwości narzędzia . . . . .	41
7.2.3.	Konfiguracja środowiska pomiarowego . . . . .	42
7.3.	Przetwarzanie danych z Nsight . . . . .	42
7.3.1.	Eksport danych . . . . .	42
7.3.2.	Kluczowe metryki . . . . .	43
7.3.3.	Metodyka pomiarów . . . . .	43

7.3.4.	Automatyzacja analizy . . . . .	43
7.4.	Podsumowanie wyboru narzędzi . . . . .	44
<b>8.</b>	<b>Testy wydajności . . . . .</b>	<b>45</b>
8.1.	Metodyka przeprowadzania testów . . . . .	45
8.1.1.	Przygotowanie środowiska testowego . . . . .	45
8.1.2.	Standaryzacja warunków testowych . . . . .	45
8.2.	Scenariusze testowe gry bullet-hell . . . . .	46
8.2.1.	Scenariusz 1: Niski poziom trudności (baseline) . . . . .	46
8.2.2.	Scenariusz 2: Średni poziom trudności . . . . .	46
8.2.3.	Scenariusz 3: Wysoki poziom trudności (test obciążeniowy) . . . . .	46
8.3.	Metryki wydajności . . . . .	47
8.3.1.	Zbierane dane . . . . .	47
8.4.	Wyniki testów dla silnika Unity . . . . .	47
8.4.1.	Ogólne wyniki wydajności . . . . .	47
8.4.2.	Analiza rozkładu czasów klatek . . . . .	48
8.4.3.	Szczegółowa analiza wywołań Vulkan API . . . . .	49
8.4.4.	Analiza wywołań systemowych (OS Runtime) . . . . .	52
8.4.5.	Interpretacja wyników i wnioski . . . . .	54
8.5.	Wyniki testów dla silnika Unreal Engine . . . . .	55
8.5.1.	Ograniczenia metodologiczne profilowania Unreal Engine . . . . .	55
8.5.2.	Metryki wykorzystania GPU . . . . .	56
8.5.3.	Analiza wywołań Vulkan API w trzech fazach . . . . .	59
8.5.4.	Analiza wywołań systemowych Unreal Engine . . . . .	61
8.5.5.	Charakterystyka architektury Unreal Engine na podstawie profilowania . . . . .	64
8.6.	Analiza porównawcza . . . . .	65
8.6.1.	Porównanie czasu klatki . . . . .	65
8.6.2.	Porównanie wykorzystania GPU . . . . .	65
8.6.3.	Porównanie zużycia pamięci . . . . .	65
8.6.4.	Porównanie liczby wywołań rysowania . . . . .	65
8.7.	Podsumowanie wyników testów wydajności . . . . .	65
<b>9.</b>	<b>Analiza możliwości i funkcjonalności . . . . .</b>	<b>66</b>
9.1.	Analiza możliwości renderingu . . . . .	66
9.1.1.	Wsparcie dla różnych technik renderingu . . . . .	66
9.1.2.	Systemy materiałów i shaderów . . . . .	66
9.1.3.	Systemy oświetlenia . . . . .	67
9.2.	Systemy fizyki i symulacji . . . . .	67
9.2.1.	Rigid body physics . . . . .	67
9.2.2.	Systemy cząstek . . . . .	67
9.3.	Systemy audio . . . . .	68



9.3.1.	Wsparcie formatów audio . . . . .	68
9.3.2.	Przestrzenny dźwięk 3D . . . . .	68
9.4.	Narzędzia deweloperskie . . . . .	68
9.4.1.	Edytory wizualne . . . . .	68
9.4.2.	Systemy debugowania . . . . .	68
9.5.	Wsparcie dla platform docelowych . . . . .	69
9.5.1.	Platformy desktop . . . . .	69
9.5.2.	Platformy mobilne . . . . .	69
9.5.3.	Konsole . . . . .	69
9.5.4.	Platformy VR/AR . . . . .	69
9.6.	Ekosystem i rozszerzalność . . . . .	70
9.6.1.	Asset Store / Marketplace . . . . .	70
9.6.2.	Wsparcie społeczności . . . . .	70
9.6.3.	Dokumentacja i materiały edukacyjne . . . . .	70
<b>10.</b>	<b>Porównanie wyników i analiza . . . . .</b>	<b>71</b>
10.1.	Synteza wyników badań . . . . .	71
10.1.1.	Zestawienie wyników testów wydajności . . . . .	71
10.1.2.	Zestawienie analizy funkcjonalności . . . . .	71
10.2.	Analiza wielokryterialna . . . . .	71
10.2.1.	Macierz porównawcza . . . . .	71
10.2.2.	Analiza wag kryteriów . . . . .	71
10.3.	Przypadki użycia . . . . .	71
10.3.1.	Gry indie . . . . .	71
10.3.2.	Gry mobilne . . . . .	72
10.3.3.	Gry AAA . . . . .	73
10.3.4.	Gry VR/AR . . . . .	73
10.4.	Weryfikacja hipotez badawczych . . . . .	73
10.4.1.	Hipoteza 1: Wydajność renderowania 3D . . . . .	74
10.4.2.	Hipoteza 2: Łatwość nauki . . . . .	74
10.4.3.	Hipoteza 3: Wsparcie mobilne . . . . .	74
10.4.4.	Hipoteza 4: Jakość grafiki . . . . .	74
10.5.	Ograniczenia badań . . . . .	75
10.5.1.	Ograniczenia metodologiczne . . . . .	75
10.5.2.	Ograniczenia techniczne . . . . .	75
10.5.3.	Ograniczenia czasowe . . . . .	75
10.6.	Implikacje praktyczne . . . . .	75
10.6.1.	Dla deweloperów indywidualnych . . . . .	75
10.6.2.	Dla małych zespołów (2-10 osób) . . . . .	75
10.6.3.	Dla studiów AAA . . . . .	75
<b>11.</b>	<b>Podsumowanie i wnioski . . . . .</b>	<b>76</b>
11.1.	Główne wyniki badań . . . . .	76
11.1.1.	Odpowiedzi na pytania badawcze . . . . .	76

11.1.2.	Weryfikacja hipotez . . . . .	76
11.2.	Wnioski praktyczne . . . . .	77
11.2.1.	Rekomendacje dla deweloperów . . . . .	77
11.2.2.	Wytyczne dla różnych typów projektów . . . . .	77
11.3.	Wkład naukowy . . . . .	77
11.3.1.	Nowatorskie aspekty badań . . . . .	77
11.3.2.	Znaczenie dla branży . . . . .	78
11.4.	Ograniczenia i przyszłe badania . . . . .	78
11.4.1.	Identyfikacja ograniczeń . . . . .	78
11.4.2.	Propozycje dalszych badań . . . . .	78
11.4.3.	Rozwój metodologii . . . . .	79
11.5.	Refleksje końcowe . . . . .	79
11.6.	Znaczenie wyników w kontekście rozwoju technologii . . .	80
<b>Bibliografia . . . . .</b>		<b>81</b>
<b>Wykaz symboli i skrótów . . . . .</b>		<b>84</b>
<b>Spis rysunków . . . . .</b>		<b>84</b>
<b>Spis tabel . . . . .</b>		<b>85</b>
<b>Spis załączników . . . . .</b>		<b>85</b>

# 1. Wstęp

## 1.1. Motywacja i cel pracy

Współczesny rynek gier komputerowych charakteryzuje się dynamicznym rozwojem technologicznym i rosnącymi wymaganiami zarówno twórców, jak i graczy. Wybór odpowiedniego silnika gier jest kluczową decyzją, która wpływa na cały proces tworzenia gry, jej wydajność oraz możliwości techniczne.

Celem niniejszej pracy jest porównanie wydajności i możliwości dwóch głównych, współczesnych silników gier komputerowych, ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na proces tworzenia gier oraz końcową jakość produktu.

## 1.2. Zakres pracy

Praca obejmuje analizę następujących aspektów:

- Wydajność renderowania grafiki
- Możliwości i funkcjonalności oferowane przez różne silniki
- Łatwość użycia i krzywa uczenia się
- Praca z narzędziem przy użyciu dużych modeli językowych
- Ekosystem narzędzi i społeczność deweloperska

## 1.3. Wybór gry testowej - gatunek bullet hell

W celu przeprowadzenia praktycznych testów wydajnościowych zdecydowano się na implementację gry z gatunku **bullet hell** (dosł. „piekło pocisków”), znanego również jako **danmaku** (z jap. „kurtyna pocisków”) lub **manic shooter**.

### 1.3.1. Charakterystyka gatunku

Bullet hell to podgatunek gier typu shoot 'em up, w którym gracz steruje zwykle niewielkim statkiem kosmicznym lub postacią, mierząc się z falami przeciwników wystrzeliwujących ogromne ilości pocisków tworzących skomplikowane wzory na ekranie. Kluczowe cechy gatunku obejmują:

- **Masowa ilość pocisków** – na ekranie jednocześnie może znajdować się od kilkuset do kilku tysięcy pocisków, tworzących złożone formacje geometryczne
- **Precyzyjne hitboxy** – obszar kolizji postaci gracza jest znacznie mniejszy niż jej wizualna reprezentacja (często ograniczony do kilku pikseli), co umożliwia nawigację między pociskami

## 1. Wstęp

- **Duża liczba przeciwników** – na ekranie jednocześnie pojawia się wiele jednostek przeciwnika, co zwiększa złożoność sytuacji i obciążenie systemu
- **Ciągły ruch** – gracz musi nieustannie przemieszczać się po ekranie, unikając kolizji
- **Eskalacja trudności** – wraz z postępem gry wzrasta liczba przeciwników i gęstość pocisków

Klasyczne przykłady gatunku to serie *Touhou Project*, *DoDonPachi*, *Ikaruga* lub *Geometry Wars*.



**Rysunek 1.1.** Przykład gry z gatunku bullet hell (seria Touhou). [1]

### 1.3.2. Uzasadnienie wyboru gatunku

Gatunek bullet hell został wybrany jako podstawa testów wydajnościowych z następujących powodów:

1. **Intensywne wykorzystanie zasobów** – jednoczesne renderowanie setek lub tysięcy obiektów (pocisków) stanowi znaczące obciążenie dla systemu renderowania
2. **Testowanie zarządzania pamięcią** – ciągłe tworzenie i niszczenie obiektów pocisków eksponuje różnice w implementacji garbage collector (Unity/C#) versus ręcznego zarządzania pamięcią (Unreal/C++)

3. **Wymagania systemu fizyki** – wykrywanie kolizji między graczem a setkami pocisków w każdej klatce obciąża system fizyki
4. **Prostota implementacji** – podstawowa mechanika gry jest stosunkowo prosta koncepcyjnie, co pozwala skupić się na porównaniu wydajności, a nie złożoności logiki gry
5. **Skalowalność testu** – łatwo kontrolować poziom obciążenia poprzez modyfikację liczby aktywnych pocisków i przeciwników
6. **Reprezentatywność dla gier 2D** – gatunek jest typowym przedstawicielem gier 2D, co pozwala ocenić wsparcie silników dla tego segmentu rynku

### 1.3.3. Parametry gry testowej

Zaimplementowana gra testowa charakteryzuje się następującymi parametrami:

- Czas rozgrywki: 90 sekund
- Eskalacja trudności: liniowy wzrost częstotliwości spawnu przeciwników
- Typy przeciwników: 3 warianty z różnymi wzorami strzelania
- System punktacji oparty na eliminacji przeciwników

Te parametry zapewniają wystarczające obciążenie systemu do ujawnienia różnic wydajnościowych między silnikami, pozostając jednocześnie w granicach typowych dla gier indie z tego gatunku.

## 1.4. Struktura pracy

Praca składa się z następujących rozdziałów:

1. **Wstęp** – wprowadzenie do tematyki, motywacja, cel i zakres pracy
2. **Przegląd literatury** – analiza istniejących badań porównawczych silników gier
3. **Charakterystyka silników** – szczegółowy opis Unity i Unreal Engine
4. **Metodologia** – opis metodyki badawczej i kryteriów porównania
5. **Analiza wywiadów** – wyniki badań jakościowych z deweloperami
6. **Implementacja gry testowej** – doświadczenia z tworzenia gry w obu silnikach
7. **Narzędzia profilowania** – opis NVIDIA Nsight i metodyki pomiarów
8. **Testy wydajności** – wyniki pomiarów wydajnościowych
9. **Analiza możliwości** – porównanie funkcjonalności silników
10. **Porównanie wyników** – synteza i analiza zebranych danych
11. **Podsumowanie** – wnioski i rekomendacje

### 1.5. Metodologia

W pracy zastosowano metodologię badawczą łączącą podejście ilościowe z jakościowym:

- **Testy wydajnościowe** – obiektywne pomiary z wykorzystaniem NVIDIA Nsight Graphics, zapewniające porównywalność wyników między silnikami
- **Wywiady z deweloperami** – badania jakościowe dostarczające kontekstu praktycznego użytkowania silników
- **Implementacja porównawcza** – stworzenie identycznej gry w obu silnikach, dokumentując różnice w procesie deweloperskim
- **Analiza dokumentacji** – przegląd oficjalnej dokumentacji i materiałów edukacyjnych

Takie wieloaspektowe podejście pozwala na kompleksową ocenę silników, uwzględniającą zarówno mierzalne parametry techniczne, jak i subiektywne doświadczenia użytkowników.

## 2. Przegląd literatury i istniejących rozwiązań

### 2.1. Historia rozwoju silników gier

Silniki gier ewoluowały znacząco od prostych bibliotek graficznych lat 80. i 90. XX wieku po współczesne, kompleksowe środowiska deweloperskie [2]. Wczesne biblioteki, takie jak Allegro (1990), OpenGL (1992), DirectX (1995) czy SDL (1998), dostarczały podstawowe funkcje graficzne i obsługę wejścia, lecz nie oferowały zintegrowanych narzędzi do tworzenia gier. Według Ullmann [3], współczesne silniki gier charakteryzują się modularną architekturą, która umożliwia ponowne wykorzystanie komponentów między różnymi projektami.

Gregory [2] w swojej pracy "Game Engine Architecture" przedstawia kompleksowy przegląd ewolucji silników gier, definiując je jako "oprogramowanie zaprojektowane specjalnie do tworzenia gier". Jego analiza pokazuje, że współczesne silniki gier składają się z kilku kluczowych warstw: warstwy platformy (platform layer), warstwy podstawowych systemów (core systems), warstwy zasobów (resource manager), warstwy renderingu (rendering engine), systemów animacji, fizyki oraz gameplay. Ta architektura warstwowa umożliwia modularność i ponowne wykorzystanie komponentów.

Pierwsze silniki gier były ściśle powiązane z konkretnym sprzętem i grami, jak np. silniki do gier id Software (Doom, Quake). Według Gregory'ego [2], przełomem było zrozumienie, że oddzielenie logiki gry od podstawowej infrastruktury technicznej pozwala na tworzenie bardziej uniwersalnych rozwiązań. Przełomem było wprowadzenie pierwszych uniwersalnych silników, które mogły być adaptowane do różnych rodzajów gier. Dzisiejsze silniki oferują zintegrowane środowiska deweloperskie z edytorami wizualnymi, systemami skryptowymi i zaawansowanymi narzędziami do debugowania.

### 2.2. Klasyfikacja silników gier

#### 2.2.1. Architektura silników według Gregory'ego

Gregory [2] przedstawia taksonomię architektur silników gier, wyróżniając kilka kluczowych typów organizacji:

- **Silniki obiektowe** - bazujące na hierarchii obiektów gry z dziedziczeniem
- **Silniki komponentowe** - wykorzystujące systemy entity-component-system (ECS)

- **Silniki hybrydowe** - łączące elementy różnych podejść architektonicznych

Autor podkreśla, że wybór architektury ma fundamentalny wpływ na wydajność, skalowalność i łatwość rozwoju gier. Systemy ECS zyskują na popularności ze względu na lepszą wydajność cache procesora i większą elastyczność w definiowaniu zachowań obiektów gry.

### 2.2.2. Silniki komercyjne vs. open source

Analiza literatury pokazuje wyraźne różnice między rozwiązaniami komercyjnymi a otwartymi. Christopoulou i Xinogalos [4] wskazują, że silniki komercyjne jak Unity czy Unreal Engine oferują lepsze wsparcie techniczne i dokumentację, podczas gdy rozwiązania open source zapewniają większą elastyczność i kontrolę nad kodem źródłowym.

Sharif i Ameen [5] podkreślają, że wybór między rozwiązaniem komercyjnym a open source zależy głównie od budżetu projektu i wymagań dotyczących dostosowania silnika do specyficznych potrzeb.

### 2.2.3. Silniki specjalistyczne vs. uniwersalne

Pavkov [6] przedstawiają podział na silniki dedykowane konkretnym gatunkom gier (np. silniki do gier strategicznych czasu rzeczywistego) oraz rozwiązania uniwersalne mogące obsługiwać różnorodne typy gier. Silniki specjalistyczne oferują zoptymalizowane funkcjonalności dla określonego zastosowania, podczas gdy uniwersalne zapewniają większą wszechstronność kosztem specjalizacji.

## 2.3. Aktualny stan badań

### 2.3.1. Badania wydajności

Messaoudi [7] przeprowadzili kompleksową analizę wydajności silnika Unity na urządzeniach mobilnych i stacjonarnych, koncentrując się na zużyciu CPU i optymalizacji logiki gry. Ich badania pokazują znaczące różnice w wydajności między platformami mobilnymi a desktop.

Abramowicz i Borczuk [8] porównali wydajność Unity i Unreal Engine w grach 3D, skupiając się na renderowaniu, systemach fizyki i zarządzaniu pamięcią. Wyniki wskazują na przewagę Unreal Engine w renderowaniu zaawansowanej grafiki 3D, podczas gdy Unity wykazuje lepszą wydajność na urządzeniach o ograniczonych zasobach.

### 2.3.2. Metodologie porównawcze

Patrasitidecha [9] opracował macierz porównawczą dla silników gier mobilnych 3D, definiując kryteria selekcji i kluczowe aspekty oceny.

Vohera [10] przedstawili architekturę silników gier i przeprowadzili studium porównawcze Unity, GameMaker, Unreal Engine i CryEngine,



koncentrując się na parametrach wydajności, funkcjonalności i łatwości użycia.

### **2.3.3. Specjalizowane zastosowania**

Marks [11] oceniali silniki gier pod kątem zastosowań w symulacjach medycznych i szkoleniach klinicznych, wprowadzając specyficzne kryteria oceny dla aplikacji edukacyjnych.

Ali i Usman [12] opracowali framework do selekcji silników gier dla zastosowań w gamifikacji i serious games, uwzględniając specyficzne wymagania tych dziedzin.

### **2.3.4. Badania społeczności i ekosystemu**

Barczak i Woźniak [13] przeprowadzili kompleksowe studium porównawcze silników gier, analizując nie tylko aspekty techniczne, ale również dostępność zasobów edukacyjnych, aktywność społeczności i długoterminowe wsparcie.

## **2.4. Motywacja i cel pracy**

Przegląd literatury pokazuje, że istnieje wiele badań porównawczych silników gier, jednak większość z nich koncentruje się na wybranych aspektach, takich jak wydajność renderowania, łatwość użycia czy wsparcie dla konkretnych platform. Niniejsza praca wpisuje się w ten nurt, przeprowadzając praktyczne porównanie silników Unity i Unreal Engine pod kątem wydajności w wybranych scenariuszach testowych.

## **2.5. Trendy technologiczne**

Ostatnie badania wskazują na rosnące znaczenie technologii ray tracing, sztucznej inteligencji w grach oraz wsparcia dla rzeczywistości wirtualnej i rozszerzonej. Masood et al. [14] analizują wykorzystanie silników gier do wysokowydajnego renderowania terenu GPU, pokazując nowe kierunki rozwoju technologii renderowania.

Badania Firat. [15] dotyczące przestrzennego dźwięku 3D w silnikach gier wskazują na rosnące znaczenie immersyjnych doświadczeń audio jako czynnika różnicującego poszczególne rozwiązania.

## 3. Charakterystyka współczesnych silników gier

### 3.1. Kryteria wyboru silników do analizy

Rynek silników gier komputerowych oferuje szeroki wachlarz rozwiązań, od prostych frameworków 2D po zaawansowane środowiska do tworzenia fotorealistycznych produkcji AAA [2]. W ramach niniejszej pracy zdecydowano się na dogłębną analizę dwóch silników: **Unity** oraz **Unreal Engine**. Wybór ten podyktowany był kilkoma kluczowymi czynnikami:

- **Dominacja rynkowa** – według raportu Video Game Insights, w 2024 roku 51% gier wydanych na platformie Steam powstało w Unity, a 28% w Unreal Engine [16]
- **Reprezentatywność podejść architektonicznych** – silniki reprezentują odmienne filozofie: Unity opiera się na języku C# z garbage collectorem, a Unreal wykorzystuje C++ z własnym systemem refleksji, makrami oraz garbage collectorem dla obiektów UObject
- **Różnorodność zastosowań** – Unity dominuje w segmencie gier mobilnych (71% z top 1000 gier mobilnych) oraz wśród deweloperów indie, natomiast Unreal generuje większe przychody w produkcjach AAA (31% przychodów Steam w 2024 vs 26% dla Unity) [16], [17]
- **Dostępność** – oba silniki oferują darmowe wersje dla małych zespołów i projektów edukacyjnych
- **Aktywna społeczność** – Unity posiada ponad 5 milionów zarejestrowanych deweloperów [17]

### 3.2. Unity

#### 3.2.1. Wprowadzenie i historia

Unity to wieloplatformowy silnik gier stworzony przez Unity Technologies, którego pierwsza wersja została zaprezentowana w czerwcu 2005 roku na konferencji Apple Worldwide Developers Conference jako narzędzie dla systemu Mac OS X [18]. Od tego czasu silnik przeszedł znaczącą ewolucję, stając się jednym z najpopularniejszych rozwiązań do tworzenia gier na świecie.

Kluczowym momentem w historii Unity było wprowadzenie darmowej wersji silnika, co znacząco obniżyło barierę wejścia dla początkujących deweloperów i małych studiów [18]. Decyzja ta przyczyniła się do wzrostu popularności silnika w segmencie gier mobilnych oraz indie.

Unity wykorzystuje język programowania **C#** działający na platformie .NET/Mono, co zapewnia:

- Automatyczne zarządzanie pamięcią poprzez garbage collector

- Bezpieczeństwo typów i obsługę wyjątków
- Bogatą bibliotekę standardową

Architektura Unity opiera się na wzorcu *GameObject-Component*, gdzie każdy obiekt w scenie (GameObject) może posiadać dowolną liczbę komponentów definiujących jego zachowanie [19], [20]. Podejście to promuje kompozycję nad dziedziczeniem i ułatwia tworzenie modularnego kodu.

#### 3.2.2. Możliwości i funkcjonalności

Unity oferuje kompleksowy zestaw narzędzi do tworzenia gier 2D i 3D:

- **Rendering** – wsparcie dla wielu pipeline’ów renderowania: Built-in, Universal Render Pipeline (URP) dla platform mobilnych oraz High Definition Render Pipeline (HDRP) dla wysokiej jakości grafiki [21], [22]
- **Fizyka** – integracja z silnikami PhysX (3D) i Box2D (2D) [23]
- **Animacja** – system Mecanim z obsługą maszyn stanów i blendingu animacji [24]
- **Audio** – wbudowany system dźwięku przestrzennego [25]
- **UI** – dwa systemy interfejsu użytkownika: uGUI oraz nowoczesny UI Toolkit [26], [27]
- **Multiplayer** – Netcode for GameObjects oraz integracja z usługami sieciowymi [28]

#### 3.2.3. Narzędzia deweloperskie

Edytor Unity zapewnia interfejs graficzny z następującymi funkcjonalnościami [18]:

- Hierarchiczny widok sceny z możliwością edycji w czasie rzeczywistym
- Inspektor właściwości z obsługą serializacji pól poprzez atrybut [SerializeField]
- Wbudowany profiler wydajności (CPU, GPU, pamięć) [29]
- Asset Store – marketplace z gotowymi zasobami i rozszerzeniami
- Obsługa hot reload – możliwość edycji kodu podczas działania gry

### 3.3. Unreal Engine

#### 3.3.1. Wprowadzenie i historia

Unreal Engine to silnik gier stworzony przez Epic Games, którego historia sięga 1998 roku, kiedy to zadebiutował wraz z grą *Unreal*. Od początku silnik był projektowany z myślą o tworzeniu gier pierwszoosobowych (FPS) o wysokiej jakości graficznej, co nadal pozostaje jego mocną stroną.

Przełomowym momentem było wydanie Unreal Engine 4 w 2014 roku na licencji royalty-free (5% od przychodów powyżej \$1 miliona), a następ-

### 3. Charakterystyka współczesnych silników gier

---

nie Unreal Engine 5 w 2022 roku, wprowadzającym technologie takie jak Nanite (wirtualizowana geometria) i Lumen (globalne oświetlenie w czasie rzeczywistym).

Unreal Engine wykorzystuje język programowania **C++** z rozszerzeniami specyficznymi dla silnika (makra UE), co zapewnia:

- Maksymalną wydajność dzięki kompilacji do kodu natywnego
- Pełną kontrolę nad zarządzaniem pamięcią
- Strome krzywe uczenia, szczególnie dla programistów bez doświadczenia w C++

Dodatkowo Unreal oferuje system **Blueprints** – wizualny język skryptowy pozwalający na tworzenie logiki gry bez pisania kodu. Szczególnie przydatne dla designerów i artystów, choć dla złożonych systemów mogą być mniej wydajne niż natywny C++.

#### 3.3.2. Możliwości i funkcjonalności

Unreal Engine wyróżnia się zaawansowanymi możliwościami graficznymi:

- **Rendering** – fotorealistyczna grafika z obsługą ray tracingu, Nanite i Lumen
- **Fizyka** – silnik Chaos Physics z obsługą destrukcji i symulacji ciał miękkich
- **Animacja** – Control Rig, Animation Blueprints, IK Retargeting
- **Landscape** – zaawansowane narzędzia do tworzenia dużych terenów
- **Niagara** – system efektów cząsteczkowych nowej generacji
- **Sequencer** – narzędzie do tworzenia cinematików i cutscen

#### 3.3.3. Narzędzia deweloperskie

Unreal Editor oferuje rozbudowane środowisko deweloperskie:

- Edytor poziomów z obsługą streamingu i Level of Detail (LOD)
- Blueprint Visual Scripting – programowanie wizualne
- Material Editor – węzłowy edytor materiałów
- Wbudowany profiler z analizą GPU/CPU i pamięci
- Marketplace – sklep z zasobami i pluginami
- Dostęp do kodu źródłowego silnika
- Live Coding – eksperymentalne wsparcie dla hot reload w C++

**Tabela 3.1.** Porównanie kluczowych cech Unity i Unreal Engine

Cecha	Unity	Unreal Engine
Język programowania	C#	C++ / Blueprints
Zarządzanie pamięcią	Automatyczne (GC)	Ręczne / Smart pointers
Architektura	GameObject-Component	Actor-Component
Natywne wsparcie 2D	Tak	Nie (symulowane)
Kod źródłowy	Częściowo dostępny	Pełny dostęp
Rozmiar pustego projektu	~100 MB	~1-2 GB
Główne zastosowania	Mobile, indie, 2D	AAA, FPS, 3D

#### 3.4. Porównanie architektoniczne

#### 3.5. Uzasadnienie wyboru do badań

Wybór Unity i Unreal Engine jako przedmiotu porównania pozwala na analizę dwóch fundamentalnie różnych podejść do tworzenia gier:

1. **Produktywność vs wydajność** – C# w Unity oferuje szybszy rozwój kosztem pewnego narzutu wydajnościowego, podczas gdy C++ w Unreal wymaga więcej pracy, ale zapewnia maksymalną kontrolę
2. **Dostępność vs specjalizacja** – Unity celuje w szeroki rynek z niskim progiem wejścia, Unreal koncentruje się na produkcjach premium
3. **Elastyczność vs integracja** – Unity pozwala na większą swobodę w doborze zewnętrznych narzędzi, Unreal oferuje bardziej zintegrowane rozwiązania

Analiza tych dwóch silników dostarcza kompleksowego obrazu współczesnego stanu technologii do tworzenia gier i pozwala na sformułowanie praktycznych rekomendacji dla deweloperów.

## **4. Metodologia badań i kryteria porównania**

### **4.1. Założenia metodologiczne**

#### **4.1.1. Cel badań**

Głównym celem badań jest obiektywne porównanie wydajności i możliwości wybranych silników gier w kontrolowanych warunkach.

#### **4.1.2. Hipotezy badawcze**

1. Silniki komercyjne oferują lepszą wydajność niż rozwiązania open source
2. Kompleksowość funkcjonalności wpływa negatywnie na wydajność
3. Łatwość użycia jest odwrotnie proporcjonalna do możliwości konfiguracji

### **4.2. Kryteria porównania**

#### **4.2.1. Wydajność**

- Szybkość renderowania (FPS)
- Zużycie pamięci RAM
- Obciążenie procesora
- Zużycie pamięci karty graficznej
- Czas ładowania scen

#### **4.2.2. Funkcjonalność**

- Wsparcie dla różnych typów renderingu
- Systemy fizyki
- Systemy audio
- Wsparcie dla VR/AR
- Możliwości skryptowania

#### **4.2.3. Użyteczność**

- Intuicyjność interfejsu
- Jakość dokumentacji
- Dostępność tutoriali
- Wsparcie społeczności
- Czas potrzebny na naukę

### **4.3. Środowisko testowe**

#### **4.3.1. Specyfikacja sprzętowa**

Wszystkie testy wydajnościowe przeprowadzono na komputerze o następującej specyfikacji:

- **Procesor:** AMD Ryzen 9 7900X3D 12-Core Processor (24 rdzenie, 48 wątków)
- **Karta graficzna:** NVIDIA GeForce RTX 3090
- **Pamięć GPU:** 24 GB GDDR6X
- **Sterowniki NVIDIA:** wersja 590.48.01
- **Pamięć RAM:** 32 GB
- **System operacyjny:** Arch Linux (jądro Linux 6.18.5-arch1-1)
- **Dysk:** SSD o pojemności 3,6 TB

### 4.3.2. Specyfikacja oprogramowania

W badaniach wykorzystano następujące wersje oprogramowania:

- **Unity:** 6.0 (6000.0.58f2) LTS
- **Unreal Engine:** 5.5.3
- **NVIDIA Nsight Systems:** 2025.5.2

Wybór wersji LTS silnika Unity podyktowany był stabilnością oraz długoterminowym wsparciem, co jest istotne z punktu widzenia powtarzalności badań. W przypadku Unreal Engine wybrano najnowszą dostępną wersję stabilną w momencie rozpoczęcia badań.

### 4.3.3. Konfiguracja testowa

Przed wykonaniem każdego testu zastosowano następującą procedurę przygotowawczą:

1. Zamknięto wszystkie aplikacje działające w tle
2. Wyłączono automatyczne aktualizacje systemu
3. Ustawiono tryb wydajności zasilania (performance mode)
4. Oczekano 5 minut na stabilizację termiczną systemu
5. Wykonano 3 pomiary dla każdego scenariusza testowego, z których obliczono wartość średnią

## 4.4. Projekt testów

### 4.4.1. Gra testowa typu *bullet hell*

Na potrzeby badań porównawczych zaimplementowano identyczną grę w gatunku *bullet hell* w obu silnikach. Gra charakteryzuje się następującymi cechami:

- Sterowany przez gracza statek kosmiczny
- System generowania przeciwników z progresywnie rosnącym obciążeniem
- Generowanie wzorców pocisków
- Wykrywanie kolizji między obiektami
- Tryb przetrwania trwający 90 sekund

Wybór gatunku *bullet hell* podyktowany był możliwością generowania dużej liczby obiektów na ekranie (pociski, przeciwnicy, efekty wizualne), co pozwala na skuteczne obciążenie silnika graficznego i zbadanie jego wydajności w warunkach ekstremalnych.

##### 4.4.2. Fazy obciążenia

Gra testowa została zaprojektowana tak, aby w ciągu 90 sekund rozgrywki przechodziła przez trzy fazy o różnym poziomie obciążenia:

##### Faza 1: Niskie obciążenie (0-30 sekund)

- Liczba pocisków na ekranie: 50-100
- Aktywni przeciwnicy: 2-3
- Oczekiwana stabilna liczba klatek: 60 FPS
- Oczekiwane wykorzystanie GPU: poniżej 50%

##### Faza 2: Średnie obciążenie (30-60 sekund)

- Liczba pocisków na ekranie: 200-300
- Aktywni przeciwnicy: 5-7
- Oczekiwane wykorzystanie GPU: 50-70%
- Możliwe niewielkie spadki liczby klatek

##### Faza 3: Wysokie obciążenie (60-90 sekund)

- Liczba pocisków na ekranie: ponad 500
- Aktywni przeciwnicy: ponad 10
- Oczekiwane wykorzystanie GPU: powyżej 70%
- Potencjalne znaczące spadki liczby klatek

##### 4.4.3. Metryki i wskaźniki

W ramach testów wydajnościowych mierzono następujące parametry:

1. **Czas klatki** (ang. *frame time*) – czas potrzebny na wyrenderowanie pojedynczej klatki, wyrażony w milisekundach
2. **Liczba klatek na sekundę** (FPS) – wartość pochodna od czasu klatki
3. **Wykorzystanie GPU** – procentowe obciążenie karty graficznej
4. **Zużycie pamięci** – pamięć VRAM oraz RAM wykorzystywana przez aplikację
5. **Liczba wywołań rysowania** (ang. *draw calls*) – liczba wywołań API graficznego na klatkę
6. **Liczba wierzchołków** – całkowita liczba wierzchołków renderowanych na klatkę

##### 4.4.4. Procedura zbierania danych

Dla każdego silnika przeprowadzono trzy pełne przebiegi gry (90 sekund każdy), co dało łącznie 6 sesji pomiarowych. Narzędzie NVIDIA Nsi-



ght Systems rejestrowało dane wydajnościowe przez cały czas trwania rozgrywki, umożliwiając późniejszą analizę poszczególnych faz obciążenia.

Punkty pomiaru dla każdej fazy:

- **Faza 1:** 10s (wczesne niskie obciążenie), 20s (stabilne niskie obciążenie), 25s (koniec fazy)
- **Faza 2:** 35s (przejście do średniego obciążenia), 45s (stabilne średnie obciążenie), 55s (koniec fazy)
- **Faza 3:** 65s (przejście do wysokiego obciążenia), 75s (szczytowe obciążenie), 85s (koniec fazy)

## 5. Analiza wywiadów z deweloperami gier

W ramach badań jakościowych przeprowadzono osiem pogłębionych wywiadów z deweloperami gier posiadającymi doświadczenie w pracy z silnikami Unity i Unreal Engine. Celem badania było zebranie praktycznych spostrzeżeń dotyczących użyteczności, wydajności oraz przepływu pracy w obu silnikach z perspektywy osób aktywnie je wykorzystujących.

### 5.1. Charakterystyka respondentów

Respondenci zostali dobrani według kryterium posiadania co najmniej rocznego doświadczenia amatorskiego lub profesjonalnego w jednym z badanych silników. Profil uczestników przedstawia się następująco:

- **Respondent 1:** Około 6-10 lat doświadczenia amatorskiego w Unity, semestr zajęć z Unreal Engine, 10-20 projektów w Unity
- **Respondent 2:** 7 lat doświadczenia amatorskiego w Unity, pół roku profesjonalnego, 15-20 projektów
- **Respondent 3:** 1,5 roku amatorskiego doświadczenia w Unity, 4 projekty zakończone
- **Respondent 4:** 2 lata profesjonalne w Unreal, 2 miesiące w Unity (z przerwami przez kilka lat), projekty w obu silnikach
- **Respondent 5:** 9 lat doświadczenia zawodowego (od 2012 Unity amatorsko, od 2016 profesjonalnie; od 2019 Unreal profesjonalnie), 10-30 projektów w Unity, 5-6 w Unreal
- **Respondent 6:** Dekada doświadczenia amatorskiego w Unity, kilka projektów game jamowych
- **Respondent 7:** 9 lat hobbystycznego doświadczenia w Unity, 2 lata profesjonalnego; 1-1,5 roku amatorskiego w Unreal
- **Respondent 8:** 2 lata amatorsko w Unity, 1,5 roku profesjonalnie + pół roku stażu w Unreal, kilkanaście projektów w obu silnikach

Łącznie badana próba reprezentuje szerokie spektrum doświadczeń – od osób skupionych wyłącznie na Unity, przez deweloperów wykorzystujących oba silniki, po profesjonalistów pracujących głównie w Unreal Engine.

### 5.2. Motywy wyboru silnika

#### 5.2.1. Przystępność i próg wejścia

Dominującym motywem wyboru Unity jako pierwszego silnika była jego **przystępność dla początkujących**. Respondenci wskazywali, że Unity oferuje mniejszą liczbę gotowych mechanik widocznych na starcie – silnik nie narzuca użytkownikowi wbudowanych rozwiązań, jeżeli ten nie

wybierze specjalnego szablonu projektu. Było to postrzegane jako zaleta dydaktyczna, ponieważ nowicjusze nie byli przytłaczani złożonością interfejsu.

Jednocześnie respondenci podkreślali, że Unreal Engine w przeszłości (około 2018 roku) charakteryzował się znacznie wyższym progiem wejścia niż obecnie. W tamtym okresie dostępnych było również więcej materiałów edukacyjnych dla Unity, co dodatkowo wpływało na wybór tego silnika przez początkujących.

Paradoksalnie, mniejsza liczba wbudowanych funkcjonalności w Unity była postrzegana jako zaleta dydaktyczna – silnik nie przytłaczał nowicjuszy złożonością interfejsu i pozwalał na stopniowe poznawanie kolejnych mechanizmów.

### 5.2.2. Język programowania

Wybór C# jako głównego języka skryptowania w Unity stanowił istotny czynnik decyzyjny dla osób z wcześniejszym doświadczeniem w tym języku. Respondenci z backgroundem w C# określali przejście do Unity jako naturalne i intuicyjne. Język ten był opisywany jako wysokopoziomowy, niewymagający ręcznego zarządzania pamięcią, co znacząco obniża barierę wejścia dla początkujących programistów.

Niektórzy respondenci zwracali uwagę, że C++ używany w Unreal Engine różni się od standardowego C++ – jest rozszerzony o makra i mechanizmy specyficzne dla silnika, co może być zaskakujące dla programistów przyzwyczajonych do klasycznego C++.

### 5.2.3. Wymagania projektu

Wybór Unreal Engine często był podyktowany specyfiką projektu lub wymaganiami rynku pracy. Respondenci wskazywali, że projekty wymagające wysokiej jakości grafiki naturalnie kierowały ich w stronę Unreal Engine. Dodatkowo, część osób rozpoczęła naukę Unreal ze względu na większą liczbę ofert pracy wymagających znajomości tego silnika, szczególnie w segmencie gier AAA i większych studiów deweloperskich.

## 5.3. Dokumentacja i materiały edukacyjne

### 5.3.1. Oficjalna dokumentacja

W zakresie dokumentacji oficjalnej respondenci wyraźnie faworyzowali Unity. Dokumentacja tego silnika była opisywana jako dogłębna i szczegółowa – praktycznie wszystkie klasy, metody i właściwości są dokładnie opisane, a dodatkowo często zawierają działające przykłady kodu, które można bezpośrednio skopiować i uruchomić w projekcie.

Dokumentacja Unreal Engine była oceniana znacznie gorzej. Respondenci określali ją jako szkieletową lub wręcz nieistniejącą w praktycznym sensie. Wiele stron dokumentacji zawiera jedynie nazwę funkcji i nazwy parametrów, bez jakiegokolwiek opisu działania. Jeden z respondentów porównał czytanie dokumentacji Unreal do przeglądania plików nagłówkowych (header files), gdzie użytkownik musi samodzielnie domyślać się, co dana funkcja robi.

Jako pozytywny aspekt ekosystemu Unreal wskazywano fora deweloperskie, gdzie profesjonalni użytkownicy dzielą się rozwiązaniami. Problemem jest jednak to, że część najbardziej wartościowych zasobów znajduje się w zamkniętych sekcjach forum, dostępnych tylko dla wybranych firm po uzyskaniu specjalnych uprawnień od Epic Games.

### 5.3.2. Nieoficjalne poradniki

W przypadku materiałów nieoficjalnych (YouTube, blogi, fora) Unity również dominowało ilościowo. Respondenci szczególnie wyróżniali kanał Brackeys jako kluczowe źródło wiedzy dla początkujących i średnio-zaawansowanych użytkowników Unity.

Poradniki do Unreal Engine były oceniane jako:

- Mniej liczne niż dla Unity
- Często nieaktualne – dotyczące starszych wersji silnika (np. Unreal 4), które mogą, ale nie muszą działać w nowszych wersjach
- Zbyt skoncentrowane na systemie Blueprints kosztem programowania w C++

### 5.3.3. Jakość dydaktyczna poradników

Respondenci zwracali uwagę na wspólny problem poradników do obu silników – koncentrację na implementacji konkretnych funkcji kosztem dobrych praktyk programistycznych. Większość dostępnych materiałów skupia się na pokazaniu, jak zaimplementować pojedynczą mechanikę, bez wyjaśniania szerszego kontekstu architektonicznego czy zasad rozszerzalności kodu.

Ten brak holistycznego podejścia sprawia, że początkujący deweloperzy potrafią zaimplementować poszczególne funkcje, ale mają trudności z połączeniem ich w spójną całość lub późniejszym rozwojem projektu.

## 5.4. Architektura i wzorce projektowe

### 5.4.1. System komponentowy Unity

Architektura Unity oparta na komponentach była oceniana pozytywnie pod względem elastyczności. Respondenci doceniali możliwość dzielenia

funkcjonalności na małe, niezależne moduły (komponenty), które następnie można łączyć w większe całości.

Jednocześnie wskazywano na problemy wynikające z długu technologicznego Unity. Silnik jest bardzo monolityczny, z głęboką hierarchią dziedziczenia podstawowych konceptów. Niektóre obiekty bazowe zajmują tak dużo pamięci, że nie mieszczą się w pojedynczej linii cache procesora, co na współczesny hardware stanowi istotny problem wydajnościowy.

### 5.4.2. Struktura Unreal Engine

Architektura Unreal Engine wymusza bardziej uporządkowany styl pracy. Respondenci zauważali, że nawet podstawowe projekty tworzone w Unreal mają tendencję do bycia lepiej zorganizowanymi, ponieważ silnik narzuca określoną strukturę.

Struktura aktor-komponent w Unreal (level zawiera aktorów, aktorzy zawierają komponenty) została opisana jako bardziej restrykcyjna niż prefaby w Unity. Próby tworzenia zagnieżdżonych struktur (aktor w aktorze) często prowadzą do problemów, podczas gdy w Unity hierarchie prefabów są bardziej elastyczne.

### 5.4.3. Specjalizacja silników

Respondenci zauważyli, że Unreal Engine jest wyraźnie zoptymalizowany pod gry typu first-person shooter. Tworzenie gier FPS w Unreal jest niezwykle proste – wystarczy zaznaczyć odpowiednie opcje. Natomiast projekty odbiegające od tego wzorca (np. gry z rozbudowanym interfejsem użytkownika, gry turowe) wymagają znacznie więcej pracy i często sprowadzają się do obchodzenia domyślnych mechanizmów silnika.

## 5.5. Kompilacja i przepływ pracy

### 5.5.1. Czas kompilacji

Czas kompilacji w Unity był identyfikowany jako znaczący problem przy większych projektach. W miarę rozrastania się bazy kodu, czas potrzebny na rekompilację po każdej zmianie rośnie.

Unity oferuje mechanizm Assembly Definitions jako rozwiązanie tego problemu. Bez podziału projektu na osobne assemblies każda zmiana w kodzie powoduje rekompilację całego projektu. Podział na mniejsze moduły pozwala kompilować tylko zmienione fragmenty, znacząco skracając czas iteracji.

### 5.5.2. Stabilność środowiska

Istotną różnicą między silnikami jest obsługa błędów krytycznych. W Unity gra uruchomiona w edytorze działa jako osobny proces – gdy wy-

stąpi błąd krytyczny, zamyka się tylko ten proces, a edytor pozostaje stabilny. W Unreal Engine silnik i gra działają jako jeden proces, więc crash w grze powoduje utratę całego edytora wraz z ewentualnymi niezapisanymi zmianami.

Ta różnica architekturealna ma istotne konsekwencje dla produktywności, szczególnie przy debugowaniu. Przy dużych projektach, gdzie uruchomienie silnika może trwać kilkanaście minut, każdy crash oznacza znaczną stratę czasu.

### 5.5.3. Kompatybilność wsteczna

Unreal Engine był krytykowany za problemy z kompatybilnością między wersjami. Respondenci wskazywali, że rozpoczęcie projektu w określonej wersji silnika może skutkować problemami, jeśli ta wersja okaże się zawierać fundamentalne błędy. Epic Games nie backportuje poprawek do starszych wersji w takim stopniu jak Unity robi to dla wersji LTS.

## 5.6. Kontrola wersji i współpraca zespołowa

### 5.6.1. Integracja z Git

Współpraca z systemem Git była oceniana lepiej dla Unity ze względu na tekstową serializację assetów. Pliki scen i prefabów w Unity są zapisywane w formacie YAML, co teoretycznie umożliwia ich mergowanie. Nowoczesne narzędzia (np. merge w Rider) potrafią automatycznie rozwiązywać niektóre konflikty na scenach.

Pliki binarne w Unreal Engine stanowią znaczące wyzwanie. Respondenci zwracali uwagę, że nawet pliki Blueprintów, które ewidentnie mają serializację tekstową, są zapisywane na dysku jako binaria. To znacznie utrudnia współpracę wielu programistów nad tym samym projektem.

### 5.6.2. Mergowanie konfliktów

Konflikty na scenach i prefabach stanowią problem w obu silnikach. Gdy dwie osoby edytują tę samą scenę, rozwiązanie konfliktu często sprowadza się do wybrania jednej wersji i ręcznego przeniesienia zmian z drugiej.

Jako rozwiązanie wskazywano praktykę lockowania plików (preferowana przy użyciu Perforce) lub podział pracy na oddzielne sceny, gdzie każdy deweloper pracuje we własnym środowisku. Unity ułatwia takie podejście dzięki elastycznemu systemowi scen, podczas gdy Unreal silnie promuje architekturę z jedną główną sceną.

## **5.7. Współpraca z osobami nietechnicznymi**

### **5.7.1. System Blueprints**

Blueprinty w Unreal Engine były postrzegane jako skuteczne narzędzie ułatwiające współpracę z osobami nietechnicznymi. System wizualnego programowania pozwala designerom i artystom na tworzenie logiki gry bez pisania kodu tekstowego. Respondenci zauważali, że osoby niebędące programistami często nie zdają sobie sprawy, że faktycznie programują, korzystając z Blueprintów.

Jednocześnie integracja Blueprintów z kodem C++ nie jest idealna. Przejście między oboma systemami wymaga dodatkowej pracy, a wystawianie funkcji C++ do Blueprintów nie zawsze działa bezproblemowo.

### **5.7.2. Narzędzia dla artystów**

Unity wymaga więcej pracy przy tworzeniu narzędzi dla osób nietechnicznych. Respondenci wskazywali, że w Unreal Engine osoby nietechniczne mają lepsze wsparcie „out of the box”, podczas gdy w Unity zazwyczaj trzeba przeprowadzać szkolenia lub tworzyć dedykowane narzędzia edytorowe, aby umożliwić artystom i designerom samodzielną pracę.

## **5.8. Asset Store i zasoby zewnętrzne**

### **5.8.1. Dostępność i jakość assetów**

Asset Store Unity był oceniany jako lepiej zarządzany i bogatszy. Respondenci wskazywali na silniejsze wsparcie społeczności i większe szanse na znalezienie potrzebnych zasobów.

Interesującą obserwacją było to, że najlepsze produkty z Asset Store mają tendencję do opuszczania platformy – twórcy zakładają własne strony internetowe po osiągnięciu określonego poziomu popularności.

Unreal Marketplace przeszedł niedawno transformację w platformę Fab, co według respondentów pogorszyło doświadczenie użytkownika i zwiększyło liczbę kroków potrzebnych do pobrania darmowych zasobów.

### **5.8.2. Zastosowanie assetów**

Assety były rekomendowane głównie do prototypowania, nie do produkcji komercyjnej. Respondenci podkreślali, że niespójny styl graficzny wynikający z łączenia assetów od różnych twórców jest gorszy niż jednolity, nawet jeśli prosty styl graficzny.

### 5.9. Wykorzystanie sztucznej inteligencji

#### 5.9.1. Doświadczenia z LLM

Większość respondentów miała ograniczone doświadczenia z wykorzystaniem AI w pracy z silnikami gier. Główna obserwacja dotyczyła niskiej jakości generowanego kodu – naprawianie błędów w kodzie wygenerowanym przez ChatGPT często zajmowało więcej czasu niż napisanie rozwiązania od podstaw.

Jednocześnie AI było wykorzystywane skuteczniej jako substytut dokumentacji dla Unreal Engine. Pomimo częstych konfabulacji, modele językowe potrafiły naprowadzić na właściwe słowa kluczowe lub nazwy funkcji, które następnie można było zweryfikować w kodzie źródłowym silnika.

#### 5.9.2. Generowanie grafik

Pozytywne doświadczenia zgłoszono w zakresie generowania placeholderów graficznych podczas game jamów. AI pozwala szybko uzyskać przyzwoicie wyglądające grafiki do prototypów, choć do wersji finalnych produktów nadal preferowana jest praca profesjonalnych grafików.

### 5.10. Optymalizacja i wydajność

#### 5.10.1. Narzut silników

Respondenci wskazywali, że Unity ma mniejszy narzut wydajnościowy niż Unreal dla prostych projektów. Czas ładowania projektów w Unity jest znacznie krótszy, co respondenci przypisywali domyślnie niższymi rozdzielczościom tekstur i prostszym ustawieniom graficznym.

#### 5.10.2. Blueprinty vs C++

Istotną różnicę wydajnościową w Unreal stanowi wybór między Blueprintami a kodem C++. Blueprinty są interpretowane w czasie wykonania jako dane, a nie kompilowane do kodu maszynowego. W praktyce oznacza to, że logika napisana w Blueprintach jest znacznie wolniejsza niż równoważny kod C++.

#### 5.10.3. Garbage Collector

Problem garbage collector w Unity był wielokrotnie wspominany jako znany problem, przed którym ostrzegają doświadczeni deweloperzy. Cykliczne uruchamianie garbage collector może powodować zauważalne zacięcia w grze. Co ciekawe, wielu respondentów wspominało o tym problemie jako o teoretycznym zagrożeniu, nie mając bezpośrednich negatywnych doświadczeń – prawdopodobnie dzięki stosowaniu praktyk takich jak object pooling.



### 5.11. Przyszłość silników i oczekiwania deweloperów

#### 5.11.1. Entity Component System (ECS)

Nowy system DOTS/ECS w Unity był oczekiwaną funkcjonalnością, która w momencie przeprowadzania wywiadów została już oficjalnie wydana. System ten pozwala na pisanie wysoce wydajnego, zorientowanego na dane kodu, kosztem większej złożoności programistycznej.

#### 5.11.2. UI Toolkit

Nowy system UI w Unity (UI Toolkit) był wskazywany jako obszar wymagający poprawy. Respondenci wyrażali nadzieję na jego dalszy rozwój w kierunku zbliżonym do technologii frontendowych, co ułatwiłoby pracę osobom z doświadczeniem w tworzeniu aplikacji webowych.

#### 5.11.3. Konkurencja Godot

Część respondentów wyraziła zainteresowanie silnikiem Godot jako alternatywą dla Unity i Unreal. Główne przyczyny to:

- Model licencyjny royalty-free (brak opłat od przychodów)
- Otwarte źródła umożliwiające modyfikację silnika
- Mniejsza złożoność ułatwiająca naukę
- Kontrowersje związane z próbą zmiany modelu licencyjnego Unity w 2023 roku

Respondenci przewidywali, że jeśli Unity nie poprawi swojego wizerunku i oferty, Godot może w przyszłości stać się poważną konkurencją w segmencie gier indie.

### 5.12. Podsumowanie wyników badań jakościowych

Na podstawie przeprowadzonych wywiadów można sformułować następujące wnioski:

#### 5.12.1. Silne strony Unity

- Wysoka jakość oficjalnej dokumentacji
- Bogaty ekosystem materiałów edukacyjnych
- Niższy próg wejścia dla początkujących
- Lepsza integracja z systemami kontroli wersji (tekstowa serializacja)
- Przystępny język programowania (C#)
- Elastyczna architektura komponentowa
- Mniejszy narzut wydajnościowy dla prostych projektów

#### 5.12.2. Silne strony Unreal Engine

- Wymuszona struktura projektu promująca dobre praktyki
- System Blueprints ułatwiający współpracę z osobami nietechnicznymi

## 5. Analiza wywiadów z deweloperami gier

---

- Więcej gotowych funkcjonalności „out of the box”
- Lepsze wsparcie dla projektów wysokobudżetowych (grafika, multiplayer)
- Dostęp do kodu źródłowego silnika
- Lepsza integracja z zewnętrznymi narzędziami graficznymi (np. Blender)

### 5.12.3. Obszary problemowe wspólne

- Trudności z mergowaniem assetów graficznych w systemach kontroli wersji
- Poradniki koncentrujące się na implementacji kosztem dobrych praktyk
- Problemy z kompatybilnością między wersjami silników

### 5.12.4. Rekomendacje z badań

Na podstawie wywiadów można zasugerować następujące kryteria wyboru silnika:

**Tabela 5.1.** Rekomendacje wyboru silnika w zależności od kontekstu projektu

Kryterium	Unity	Unreal Engine
Doświadczenie zespołu	Początkujący, znajomość C#	Średniozaawansowany, znajomość C++
Typ projektu	Gry mobilne, 2D, indie	FPS, AAA, realistyczna grafika
Skład zespołu	Programiści	Mieszany (designerzy, artyści)
Budżet czasowy na naukę	Krótki	Średni do długiego
Wymagania graficzne	Standardowe	Wysokie

Wyniki badań jakościowych uzupełniają obiektywne testy wydajnościowe przedstawione w rozdziale 8, dostarczając kontekstu praktycznego użytkowania obu silników w rzeczywistych projektach.

## 6. Doświadczenia z implementacji gry testowej

W ramach praktycznej części badań zaimplementowano grę typu bullet-hell w obu porównywanych silnikach. Gatunek ten został wybrany ze względu na jego wymagania wydajnościowe – jednocześnie renderowanie setek pocisków na ekranie stanowi doskonały test możliwości graficznych oraz efektywności zarządzania pamięcią przez silnik.

### 6.1. Opis projektu testowego

Zaimplementowana gra to klasyczny przedstawiciel gatunku bullet-hell, w którym gracz steruje statkiem kosmicznym i musi przetrwać przez określony czas (90 sekund), unikając pocisków wrogów i eliminując przeciwników. Kluczowe mechaniki gry obejmują:

- System spawnu wrogów z eskalującą trudnością – częstotliwość pojawiania się przeciwników wzrasta wraz z upływem czasu
- System pocisków z object poolingiem – optymalizacja pozwalająca na obsługę setek aktywnych pocisków
- System zdrowia i kolizji dla gracza oraz przeciwników
- Dynamiczne tło z efektem paralaksy
- System punktacji i warunki zwycięstwa/porażki

### 6.2. Implementacja w Unity

#### 6.2.1. Środowisko i konfiguracja projektu

Projekt Unity został utworzony w wersji LTS z wykorzystaniem standardowego renderera 2D. Instalacja silnika na systemie Linux przebiegła bezproblemowo dzięki Unity Hub, który zapewnia spójne zarządzanie wersjami edytora i projektami.

Struktura projektu została zorganizowana według wzorca przestrzeni nazw, co pozwoliło na czytelną organizację kodu i uniknięcie konfliktów nazw.

#### 6.2.2. Architektura systemu

Implementacja Unity wykorzystuje kilka kluczowych wzorców projektowych:

**Wzorzec Bootstrap** Klasa `GameBootstrap` wykorzystuje atrybut `[RuntimeInitializeOnLoadMethod]` do zapewnienia, że obiekt `GameInitializer` istnieje w scenie przed rozpoczęciem gry. Jest to eleganckie rozwiązanie problemu inicjalizacji singletonów w Unity.

**Object Pooling** System BulletPool stanowi rdzeń optymalizacji wydajnościowej. Zamiast ciągłego tworzenia i niszczenia obiektów pocisków (co generowałoby znaczące obciążenie garbage collector), pociski są re-cyklingowane z puli:

**Listing 1.** Fragment implementacji object pooling w Unity

```
public Bullet Spawn(Vector2 position, Vector2 direction,
                    float speed, float damage)
{
    Bullet bullet = _pool.Count > 0
        ? _pool.Dequeue()
        : Bullet.Create(this, bulletColor, faction);
    _liveBullets.Add(bullet);
    bullet.gameObject.SetActive(true);
    bullet.transform.position = position;
    bullet.Configure(direction, speed, damage, faction);
    return bullet;
}
```

Pula jest wstępnie rozgrzewana (*warm capacity*) podczas inicjalizacji, co eliminuje alokacje podczas rozgrywki.

**Singleton Pattern** Klasy GameDirector i EnemySpawner wykorzystują wzorzec Singleton z właściwością Instance, zapewniając globalny punkt dostępu do kluczowych systemów gry.

### 6.2.3. System spawnu przeciwników

EnemySpawner implementuje system eskalującej trudności poprzez interpolację czasu między spawnami:

**Listing 2.** Interpolacja trudności w Unity

```
float t = _elapsed / totalDuration;
float delay = Mathf.Lerp(spawnDelayStart, spawnDelayEnd, t);
```

Przeciwnicy są definiowani przez strukturę EnemyBlueprint, która zawiera parametry takie jak prędkość, zdrowie, wzorce strzelania i zachowania. To podejście data-driven pozwala na łatwe tworzenie różnorodnych typów wrogów.

### 6.2.4. Wyzwania napotkane w Unity

Podczas implementacji napotkano następujące wyzwania:

1. **Garbage Collection** – początkowa implementacja bez object pooling powodowała zauważalne spadki klatek przy dużej liczbie pocisków

2. **Kolejność inicjalizacji** – konieczność użycia wzorca Bootstrap wynikała z nieprzewidywalnej kolejności wywoływania metod `Awake()` i `Start()`
3. **Serializacja** – atrybuty `[SerializeField]` wymagały starannego rozplanowania, które pola powinny być edytowalne w inspektorze

### 6.2.5. Pozytywne aspekty Unity

- Natywne wsparcie dla 2D – dedykowany tryb 2D z odpowiednimi komponentami fizyki (`Rigidbody2D`, `Collider2D`)
- Hot reload – możliwość edycji kodu i natychmiastowego testowania zmian
- Intuicyjny inspektor – łatwa konfiguracja parametrów gry bez rekompilacji
- Bogata dokumentacja C# i społeczność

## 6.3. Implementacja w Unreal Engine

### 6.3.1. Środowisko i konfiguracja projektu

Instalacja Unreal Engine na systemie Linux okazała się znacznie bardziej skomplikowana niż w przypadku Unity. Dostępne są dwie ścieżki:

1. Uzyskanie dostępu do oficjalnego repozytorium GitHub Epic Games i samodzielna kompilacja silnika ze źródeł
2. Pobranie prekompilowanej wersji binarnej

Należy zauważyć, że Unreal Engine nie oferuje wersji LTS (Long Term Support), co może stanowić wyzwanie dla długoterminowych projektów.

### 6.3.2. Podejście do grafiki 2D

Fundamentalna różnica między Unity a Unreal w kontekście gier 2D polega na tym, że Unreal traktuje 2D jako „fałszywe 2D” – w rzeczywistości jest to scena 3D z zablokowaną trzecią osią i kamerą ortograficzną. Unity natomiast oferuje dedykowany tryb 2D z wyspecjalizowanymi komponentami.

Ta różnica ma praktyczne konsekwencje:

- W Unreal konieczne jest ręczne konfigurowanie kamery ortograficznej
- Fizyka 2D w Unreal wykorzystuje te same komponenty co 3D, z ograniczeniami na odpowiednich osiach
- Sprite'y w Unreal są renderowane jako płaskie meshe w przestrzeni 3D

### 6.3.3. System Blueprintów vs C++

Unreal oferuje dwa podejścia do programowania logiki gry:

**Blueprinty** – wizualny system skryptowy, który pozwala na szybkie prototypowanie bez pisania kodu. Dla prostych mechanik bullet-hell Blueprinty okazały się wystarczające i intuicyjne.

**C++** – dla bardziej wydajnościowo krytycznych elementów (jak system object pooling) zalecane jest użycie C++. Jednak próg wejścia jest znacznie wyższy niż w przypadku C# w Unity.

### 6.3.4. Object Pooling w Unreal

Implementacja object pooling w Unreal wymaga innego podejścia niż w Unity. Zamiast prostego `SetActive(true/false)`, Unreal wykorzystuje:

- `SetActorHiddenInGame()` – kontrola widoczności
- `SetActorEnableCollision()` – kontrola kolizji
- `SetActorTickEnabled()` – kontrola aktualizacji logiki

Ta granularność daje większą kontrolę, ale wymaga więcej kodu do osiągnięcia tego samego efektu.

### 6.3.5. Wyzwania napotkane w Unreal

1. **Brak natywnego 2D** – konieczność “symulowania” środowiska 2D w silniku 3D
2. **Czas kompilacji** – kompilacja projektów C++ jest znacznie wolniejsza niż kompilacja C# w Unity
3. **Rozmiar projektu** – nawet prosty projekt Unreal zajmuje wielokrotnie więcej miejsca na dysku
4. **Dokumentacja** – dla mniej popularnych zastosowań (jak gry 2D) dokumentacja jest ograniczona
5. **Blueprinty i kontrola wersji** – pliki Blueprintów są binarne, co utrudnia merge’owanie i code review

### 6.3.6. Pozytywne aspekty Unreal

- Potężny system materiałów i efektów wizualnych
- Wbudowane zaawansowane narzędzia profilowania
- Blueprinty umożliwiają szybkie prototypowanie przez osoby nietechniczne
- Doskonałe wsparcie dla grafiki 3D i fotorealizmu

## 6.4. Porównanie doświadczeń implementacyjnych

### 6.5. Wnioski z implementacji

Doświadczenia z implementacji gry bullet-hell potwierdzają, że wybór silnika powinien być uzależniony od typu projektu:

**Tabela 6.1.** Porównanie doświadczeń z implementacji gry bullet-hell

Aspekt	Unity	Unreal Engine
Czas instalacji (Linux)	~30 min	~2-4 h
Wsparcie natywne 2D	Tak	Nie (symulowane)
Język programowania	C#	C++ / Blueprinty
Próg wejścia	Niski	Średni/Wysoki
Czas kompilacji	Szybki	Wolny (C++)
Object pooling	Prosty	Bardziej złożony
Hot reload	Tak	Ograniczony
Rozmiar projektu	Mały	Duży

1. **Dla gier 2D** – Unity oferuje znacznie lepsze wsparcie natywne, niższy próg wejścia i szybszy cykl iteracji
2. **Dla gier 3D AAA** – Unreal Engine dysponuje lepszymi narzędziami do tworzenia fotorealistycznej grafiki
3. **Dla prototypowania** – Unity pozwala na szybsze testowanie koncepcji dzięki hot reloadowi i prostszej konfiguracji
4. **Dla zespołów mieszanych** – Blueprinty Unreal mogą być wartościowe dla współpracy z designerami, choć problemy z kontrolą wersji stanowią wyzwanie

Implementacja gry bullet-hell w Unity zajęła około 60% czasu potrzebnego na implementację analogicznej funkcjonalności w Unreal Engine, głównie ze względu na natywne wsparcie 2D i prostszy system object pooling.

## 7. Narzędzia profilowania wydajności

Obiektywne porównanie wydajności silników gier wymaga zastosowania odpowiednich narzędzi pomiarowych. W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę dostępnych rozwiązań oraz uzasadnienie wyboru NVIDIA Nsight jako głównego narzędzia profilowania.

### 7.1. Wbudowane narzędzia diagnostyczne silników

Zarówno Unity, jak i Unreal Engine oferują własne, wbudowane narzędzia do analizy wydajności. Każde z nich posiada unikalne cechy dostosowane do specyfiki danego silnika.

#### 7.1.1. Unity Profiler

Unity dostarcza rozbudowany profiler dostępny bezpośrednio w edytorze (Window → Analysis → Profiler). Narzędzie to oferuje:

- **CPU Profiler** – analiza czasu wykonania poszczególnych funkcji, z podziałem na kategorie (rendering, skrypty, fizyka, animacje)
- **GPU Profiler** – pomiar czasu renderowania na karcie graficznej
- **Memory Profiler** – szczegółowa analiza alokacji pamięci, wykrywanie wycieków
- **Audio Profiler** – monitorowanie obciążenia systemu dźwiękowego
- **Physics Profiler** – analiza wydajności silnika fizyki
- **Frame Debugger** – krokowa analiza procesu renderowania pojedynczej klatki

Unity Profiler umożliwia również zdalne profilowanie aplikacji uruchomionej na urządzeniu docelowym (np. smartfonie), co jest szczególnie przydatne przy optymalizacji gier mobilnych.

#### 7.1.2. Unreal Insights

Unreal Engine oferuje narzędzie Unreal Insights, które zastąpiło starszy system Session Frontend. Kluczowe funkcjonalności obejmują:

- **Timing Insights** – precyzyjny pomiar czasu wykonania poszczególnych systemów silnika
- **Asset Loading Insights** – analiza czasu ładowania zasobów
- **Memory Insights** – monitorowanie alokacji i dealokacji pamięci
- **Animation Insights** – profilowanie systemu animacji
- **Network Insights** – analiza ruchu sieciowego w grach multiplayer

Dodatkowo Unreal Engine udostępnia komendy konsolowe (np. `stat fps`, `stat unit`, `stat gpu`) pozwalające na szybki podgląd podstawowych metryk wydajności podczas rozgrywki.



### 7.1.3. Ograniczenia narzędzi wbudowanych

Pomimo rozbudowanych możliwości, wbudowane profilery silników posiadają istotne ograniczenia w kontekście porównawczych badań wydajnościowych:

1. **Brak standaryzacji metryk** – każdy silnik definiuje i mierzy parametry w odmienny sposób, co utrudnia bezpośrednie porównania
2. **Różna granularność danych** – poziom szczegółowości raportów różni się między silnikami
3. **Narzut profilowania** – wbudowane profilery same generują obciążenie, które może być różne dla każdego silnika
4. **Brak dostępu do danych niskopoziomowych** – profilery silnikowe operują na poziomie abstrakcji silnika, nie hardware'u
5. **Nieporównywalność formatów wyjściowych** – dane eksportowane przez różne profilery mają odmienne struktury

Z powyższych powodów zdecydowano się na zastosowanie zewnętrznego, niezależnego od silnika narzędzia profilowania.

## 7.2. NVIDIA Nsight Graphics

NVIDIA Nsight Graphics to profesjonalne narzędzie do profilowania i debugowania aplikacji graficznych, oferujące głęboki wgląd w działanie GPU niezależnie od używanego silnika czy API graficznego.

### 7.2.1. Uzasadnienie wyboru

Wybór NVIDIA Nsight jako głównego narzędzia pomiarowego podyktowany był następującymi czynnikami:

- **Niezależność od silnika** – Nsight analizuje aplikację na poziomie wywołań API graficznego (DirectX, Vulkan, OpenGL), co zapewnia porównywalność wyników między Unity a Unreal Engine
- **Standaryzowane metryki** – narzędzie dostarcza zunifikowany zestaw metryk sprzętowych (GPU utilization, memory bandwidth, shader throughput)
- **Minimalny narzut** – profilowanie na poziomie sterownika generuje mniejsze zakłócenia niż profilery działające wewnątrz silnika
- **Dostęp do danych niskopoziomowych** – możliwość analizy poszczególnych wywołań draw call, shaderów, transferów pamięci
- **Spójny format danych** – wyniki z obu silników mają identyczną strukturę, co ułatwia automatyzację analizy

### 7.2.2. Możliwości narzędzia

NVIDIA Nsight Graphics oferuje szereg funkcjonalności istotnych dla badań wydajnościowych:

**Frame Profiler** Główny moduł analizy wydajności, umożliwiający:

- Przechwycenie i analizę pojedynczej klatki (frame capture)
- Hierarchiczny widok wszystkich wywołań GPU
- Pomiar czasu wykonania każdego etapu renderowania
- Identyfikację wąskich gardeł (bottlenecks)
- Analizę wykorzystania jednostek obliczeniowych GPU

**GPU Trace** Moduł do długoterminowej analizy wydajności:

- Rejestrowanie metryk przez określony czas (nie tylko pojedyncza klatka)
- Wykrywanie spadków wydajności i ich przyczyn
- Analiza zmienności czasów klatek (frame time variance)
- Korelacja obciążenia GPU z wydarzeniami w grze

**Shader Profiler** Narzędzie do optymalizacji shaderów:

- Analiza wydajności poszczególnych shaderów
- Identyfikacja nieefektywnych instrukcji
- Pomiar occupancy (wykorzystania jednostek obliczeniowych)
- Sugestie optymalizacyjne

### 7.2.3. Konfiguracja środowiska pomiarowego

Przed przeprowadzeniem pomiarów skonfigurowano środowisko w następujący sposób:

1. Wyłączenie V-Sync w obu silnikach (eliminacja sztucznego ograniczenia FPS)
2. Ustawienie identycznej rozdzielczości renderowania (1920×1080)
3. Wyłączenie dynamicznego skalowania rozdzielczości
4. Ustawienie stałej częstotliwości zegara GPU (eliminacja power throttlingu)
5. Zamknięcie zbędnych procesów w tle
6. Oczekiwanie na ustabilizowanie temperatury GPU przed pomiarem

## 7.3. Przetwarzanie danych z Nsight

Dane zebrane przez NVIDIA Nsight wymagają odpowiedniego przetworzenia w celu uzyskania porównywalnych metryk.

### 7.3.1. Eksport danych

Nsight umożliwia eksport danych w kilku formatach:

- **CSV** – tabularyczne dane liczbowe, idealne do dalszej analizy
- **JSON** – strukturalne dane z pełną hierarchią wywołań
- **HTML Report** – czytelny raport z wykresami (mniej przydatny do automatyzacji)

W niniejszej pracy wykorzystano format CSV ze względu na łatwość importu do narzędzi analizy statystycznej.

### 7.3.2. Kluczowe metryki

Z danych eksportowanych przez Nsight wyodrębniono następujące metryki:

**Tabela 7.1.** Kluczowe metryki wydajnościowe z NVIDIA Nsight

<b>Metryka</b>	<b>Jednostka</b>	<b>Opis</b>
Frame Time	ms	Całkowity czas renderowania klatki
GPU Duration	ms	Czas pracy GPU (bez CPU overhead)
Draw Calls	liczba	Ilość wywołań rysowania na klatkę
Triangles Rendered	liczba	Liczba wyrenderowanych trójkątów
GPU Memory Used	MB	Zużycie pamięci VRAM
SM Occupancy	%	Wykorzystanie jednostek obliczeniowych
Memory Bandwidth	GB/s	Przepustowość pamięci GPU

### 7.3.3. Metodyka pomiarów

Dla każdej konfiguracji testowej przeprowadzono serię pomiarów według następującego protokołu:

1. Uruchomienie aplikacji i oczekiwanie 30 sekund na stabilizację
2. Rozpoczęcie rejestracji GPU Trace (czas trwania: 60 sekund)
3. Przechwycenie 10 pojedynczych klatek w równych odstępach czasu
4. Zakończenie rejestracji i eksport danych
5. Powtórzenie procedury 3 razy dla każdej konfiguracji

Wyniki uśredniono, odrzucając wartości odstające (outliers) zidentyfikowane metodą IQR (InterQuartile Range).

### 7.3.4. Automatyzacja analizy

W celu zapewnienia powtarzalności i eliminacji błędów ludzkich, proces analizy danych został częściowo zautomatyzowany za pomocą skryptów Python. Główne etapy obejmowały:

- Parsowanie plików CSV eksportowanych z Nsight
- Agregację danych z wielu sesji pomiarowych
- Obliczanie statystyk opisowych (średnia, mediana, odchylenie standardowe)

- Generowanie wykresów porównawczych
- Eksport wyników do formatu LaTeX (tabele)

### 7.4. Podsumowanie wyboru narzędzi

Zastosowanie NVIDIA Nsight jako głównego narzędzia profilowania zapewnia:

1. **Obiektywność** – pomiary wykonywane na tym samym poziomie abstrakcji dla obu silników
2. **Porównywalność** – identyczne metryki i format danych
3. **Wiarygodność** – niskopoziomowe pomiary eliminują artefakty wprowadzane przez profilery silnikowe
4. **Powtarzalność** – standaryzowana procedura pomiarowa

Wbudowane profilery Unity i Unreal Engine pozostają cennym narzędziem podczas procesu optymalizacji, jednak do celów badawczych wymagających bezpośredniego porównania między silnikami, zewnętrzne narzędzie oferuje znaczące przewagi metodologiczne.

## 8. Testy wydajności

### 8.1. Metodyka przeprowadzania testów

#### 8.1.1. Przygotowanie środowiska testowego

Wszystkie testy wydajnościowe przeprowadzono w kontrolowanych warunkach, zapewniających powtarzalność i porównywalność wyników [30]. Przed każdym cyklem pomiarowym wykonano następujące kroki przygotowawcze:

1. Zamknięto wszystkie aplikacje działające w tle
2. Wyłączono automatyczne aktualizacje systemu operacyjnego
3. Oczekano 1 minutę na stabilizację temperatury komponentów
4. Uruchomiono NVIDIA Nsight Systems w trybie profilowania
5. Skonfigurowano Nsight do przechwytywania danych z uruchamianej gry
6. Wykonano jeden pomiar próbny przed rejestracją właściwych wyników

#### 8.1.2. Standaryzacja warunków testowych

Aby zapewnić porównywalność wyników między Unity a Unreal Engine, opracowano trzy scenariusze testowe o zróżnicowanym poziomie obciążenia. Każdy scenariusz został zaimplementowany w identyczny sposób w obu silnikach, z następującymi parametrami:

**Tabela 8.1.** Parametry scenariuszy testowych

Parametr	Niski	Średni	Wysoki
Liczba pocisków	50-100	200-300	500+
Liczba przeciwników	2-3	5-7	10+
Czas trwania testu	30 s	30 s	30 s
Liczba pomiarów	5	5	5

Dodatkowo w celu zapewnienia porównywalności wyników między silnikami Unity i Unreal Engine:

- Obie gry uruchamiano w tej samej rozdzielczości (1920×1080)
- Wyłączono synchronizację pionową (V-Sync) w obu implementacjach
- Zastosowano identyczną mechanikę rozgrywki i parametry generowania przeciwników
- Każdy test powtórzono trzykrotnie, obliczając wartości średnie

### 8.2. Scenariusze testowe gry bullet-hell

#### 8.2.1. Scenariusz 1: Niski poziom trudności (baseline)

**Cel testu** Ustalenie wydajności bazowej przy minimalnym obciążeniu systemu renderowania i fizyki.

##### Parametry

- **Liczba pocisków na ekranie:** 50–100 jednocześnie
- **Aktywni przeciwnicy:** 2–3 jednostki
- **Czas trwania pomiaru:** 30 sekund
- **Liczba powtórzeń:** 5 przechwytów klatek w odstępach 5-sekundowych

**Oczekiwane rezultaty** W scenariuszu bazowym oczekiwano stabilnej częstotliwości odświeżania na poziomie 60 FPS, niskiego wykorzystania GPU (<50%) oraz minimalnego zużycia pamięci.

#### 8.2.2. Scenariusz 2: Średni poziom trudności

**Cel testu** Ocena wydajności przy umiarkowanym obciążeniu systemu, symulująca typową rozgrywkę.

##### Parametry

- **Liczba pocisków na ekranie:** 200–300 jednocześnie
- **Aktywni przeciwnicy:** 5–7 jednostek
- **Czas trwania pomiaru:** 30 sekund
- **Liczba powtórzeń:** 5 przechwytów klatek w odstępach 5-sekundowych

**Oczekiwane rezultaty** Przewidywano umiarkowane wykorzystanie GPU (50–70%), możliwe niewielkie spadki częstotliwości klatek oraz wzrost zużycia pamięci.

#### 8.2.3. Scenariusz 3: Wysoki poziom trudności (test obciążeniowy)

**Cel testu** Weryfikacja wydajności w ekstremalnych warunkach przy maksymalnym obciążeniu systemu.

##### Parametry

- **Liczba pocisków na ekranie:** 500+ jednocześnie
- **Aktywni przeciwnicy:** 10+ jednostek
- **Czas trwania pomiaru:** 30 sekund
- **Liczba powtórzeń:** 5 przechwytów klatek w odstępach 5-sekundowych

**Oczekiwane rezultaty** W scenariuszu obciążeniowym spodziewano się wysokiego wykorzystania GPU (>70%), potencjalnych spadków wydajności oraz maksymalnego zaobserwowanego zużycia pamięci.

### 8.3. Metryki wydajności

#### 8.3.1. Zbierane dane

Dla każdego scenariusza i silnika rejestrowano następujące metryki przy użyciu NVIDIA Nsight Systems:

- **Czas klatki** (frame time) – czas renderowania pojedynczej klatki w milisekundach
- **FPS** (frames per second) – liczba klatek na sekundę, wyliczana jako  $1000/\text{frame time}$
- **Wykorzystanie GPU** – procent wykorzystania mocy obliczeniowej karty graficznej
- **Zużycie pamięci VRAM** – ilość zajętej pamięci karty graficznej w megabajtach
- **Liczba wywołań rysowania** (draw calls) – liczba instrukcji renderowania na klatkę
- **Liczba wierzchołków** – całkowita liczba przetworzonych wierzchołków na klatkę

### 8.4. Wyniki testów dla silnika Unity

Profilowanie silnika Unity przeprowadzono przy użyciu narzędzia NVIDIA Nsight Systems w wersji 2025.5.2, które umożliwia szczegółową analizę wywołań API graficznych oraz funkcji systemowych na poziomie pojedynczych mikrosekund. Test trwał 95 sekund, podczas których gra działała w trybie stacjonarnym (gracz nieruchomy) z włączoną nieśmiertelnością, co pozwoliło na stabilne pomiary bez przerywania rozgrywki.

#### 8.4.1. Ogólne wyniki wydajności

Podczas 94,16-sekundowego okresu aktywnego renderowania zarejestrowano łącznie 13 556 klatek, co przekłada się na średnią wydajność **143,96 klatek na sekundę** (FPS). Jest to wynik znacząco przewyższający standardowy cel wydajnościowy 60 FPS dla aplikacji interaktywnych, wskazujący na bardzo dobrą optymalizację silnika Unity dla testowanej sceny.

Tabela 8.2 przedstawia podstawowe metryki wydajności. Średni czas klatki wynoszący 6,95 ms oznacza, że silnik Unity jest w stanie wyrenderować pojedynczą klatkę w czasie znacznie krótszym niż wymagane 16,67 ms dla osiągnięcia 60 FPS. Minimalny czas klatki 0,08 ms odpowiada sytuacji, gdy kolejne wywołania prezentacji następują niemal natychmiast po sobie – może to wynikać z mechanizmu podwójnego buforowania (ang. *double buffering*) lub chwilowego braku pracy do wykonania przez GPU.

Wartość maksymalna 1 239,62 ms (ponad sekunda) wymaga szczególnej uwagi. Tak długi czas klatki występuje podczas fazy inicjalizacji apli-

**Tabela 8.2.** Ogólne metryki wydajności silnika Unity

<b>Metryka</b>	<b>Wartość</b>
Czas trwania testu	94,16 s
Liczba wyrenderowanych klatek	13 556
Średnia liczba FPS	143,96
Średni czas klatki	6,95 ms
Minimalny czas klatki	0,08 ms
Maksymalny czas klatki	1 239,62 ms
Odchylenie standardowe	10,64 ms
Współczynnik zmienności	153,24%

kacji, gdy silnik Unity wykonuje jednorazowe operacje: kompilację shaderów, alokację dużych bloków pamięci GPU, tworzenie obiektów swap-chain oraz inicjalizację systemu renderowania. Jest to zachowanie typowe dla aplikacji Vulkan, gdzie znaczna część pracy inicjalizacyjnej wykonywana jest przy starcie, w przeciwieństwie do OpenGL, gdzie inicjalizacja jest bardziej rozłożona w czasie.

Współczynnik zmienności (CV) wynoszący 153,24% jest wysoki, jednak wynika on głównie z uwzględnienia ekstremalnych wartości inicjalizacyjnych. Po wykluczeniu pierwszych kilku klatek, stabilność renderowania jest znacznie wyższa, co potwierdza analiza percentylowa przedstawiona w dalszej części.

#### 8.4.2. Analiza rozkładu czasów klatek

Szczegółowa analiza rozkładu czasów klatek pozwala ocenić nie tylko średnią wydajność, ale przede wszystkim stabilność i przewidywalność działania silnika – aspekty kluczowe dla komfortu odbiorcy gry.

**Tabela 8.3.** Rozkład percentylowy czasów klatek silnika Unity

<b>Percentyl</b>	<b>Czas klatki (ms)</b>	<b>Odpowiadający FPS</b>
1. percentyl (najszybsze 1%)	0,71	1 408
5. percentyl	6,69	149
25. percentyl (Q1)	6,90	145
50. percentyl (mediana)	6,94	144
75. percentyl (Q3)	6,98	143
95. percentyl	7,18	139
99. percentyl (najwolniejsze 1%)	7,58	132

Tabela 8.3 prezentuje rozkład percentylowy czasów klatek. **Mediana** (50. percentyl) wynosząca 6,94 ms jest niemal identyczna ze średnią arytmetyczną (6,95 ms), co wskazuje na symetryczny rozkład czasów klatek w normalnych warunkach pracy. W praktyce oznacza to, że typowa klatka renderowana jest w czasie bardzo zbliżonym do wartości średniej.



Szczególnie istotny jest **99. percentyl** wynoszący 7,58 ms. Wartość ta, określana w środowisku graczy jako „1% low”, reprezentuje wydajność w najgorszych 1% przypadków. Różnica między medianą (6,94 ms) a 99. percentylem (7,58 ms) wynosi zaledwie 0,64 ms (9,2%), co świadczy o **wyjątkowej stabilności** renderowania. Dla porównania, w wielu grach różnica ta przekracza 50%, co objawia się zauważalnymi „przycięciami” obrazu.

**Rozstęp międzykwartylowy (IQR)**, czyli różnica między 75. a 25. percentylem, wynosi zaledwie 0,08 ms. Tak niski IQR potwierdza, że 50% środkowych czasów klatek mieści się w niezwykle wąskim przedziale, co jest oznaką deterministycznego i przewidywalnego zachowania potoku renderowania.

**Tabela 8.4.** Histogram czasów klatek silnika Unity

Przedział czasu klatki	Liczba klatek	Udział (%)
0-5 ms (>200 FPS)	230	1,70
5-10 ms (100-200 FPS)	13 317	98,24
10-16,67 ms (60-100 FPS)	4	0,03
16,67-33,33 ms (30-60 FPS)	2	0,01
>33,33 ms (<30 FPS)	2	0,01

Histogram przedstawiony w tabeli 8.4 dostarcza dodatkowego wglądu w rozkład wydajności. **98,24% wszystkich klatek** zostało wyrenderowanych w czasie 5-10 ms, co odpowiada wydajności 100-200 FPS. Jedynie 8 klatek (0,06%) przekroczyło próg 10 ms, przy czym klatki poniżej 60 FPS (>16,67 ms) stanowiły zaledwie 0,02% – praktycznie wszystkie z nich przypadły na fazę inicjalizacji.

Kategoria 0-5 ms (230 klatek, 1,70%) reprezentuje sytuacje szczególne: bardzo szybkie klatki podczas przejść między scenami, momenty niskiego obciążenia lub artefakty pomiarowe wynikające z mechanizmu synchronizacji swapchain.

#### 8.4.3. Szczegółowa analiza wywołań Vulkan API

NVIDIA Nsight Systems przechwytyje wszystkie wywołania interfejsu programistycznego Vulkan, umożliwiając dokładną analizę zachowania silnika renderującego na poziomie pojedynczych funkcji API. Podczas testu zarejestrowano łącznie **218 815 wywołań** 31 różnych funkcji Vulkan API.

**Funkcja vkWaitForFences - synchronizacja CPU-GPU** Funkcja vkWaitForFences pochłonęła **95,2% całkowitego czasu** profilowania wywołań Vulkan API, co stanowi 77,04 sekundy z 94-sekundowego testu. Funkcja ta, zdefiniowana w specyfikacji Vulkan w rozdziale 7.3 dotyczącym synchronizacji,

**Tabela 8.5.** Wywołania Vulkan API silnika Unity – funkcje synchronizacji i prezentacji

Funkcja	Czas (%)	Wywołania	Śr. (ms)	Med. (ms)	Maks. (ms)
vkWaitForFences	95,2	12 895	5,97	6,23	1 181,17
vkQueuePresentKHR	3,2	13 556	0,19	0,02	7,00
vkQueueSubmit	0,8	27 112	0,03	0,01	2,00
vkAcquireNextImageKHR	0,0	13 556	0,001	0,001	0,001
vkQueueWaitIdle	0,0	1	0,27	0,27	0,27

realizuje blokujące oczekiwanie procesora na sygnalizację obiektów ogrodzenia (ang. *fence*) przez GPU.

Mechanizm ogrodzeń w Vulkan działa następująco: aplikacja tworzy obiekt fence, dołącza go do operacji przesyłanej do kolejki GPU (np. poprzez `vkQueueSubmit`), a następnie może wywołać `vkWaitForFences`, aby zablokować wątek CPU do momentu zakończenia powiązanej pracy przez GPU. Jest to fundamentalny mechanizm synchronizacji w architekturze producent-konsument między CPU a GPU.

Tak wysoki udział procentowy (95,2%) jednoznacznie wskazuje na scenariusz **ograniczenia wydajności przez GPU** (ang. *GPU-bound*). W tym scenariuszu procesor główny zakończył przygotowywanie i przesyłanie poleceń renderowania, a następnie oczekuje na ukończenie ich wykonania przez kartę graficzną. Jest to pożądany wzorzec w dobrze zoptymalizowanych aplikacjach graficznych – procesor nie stanowi wąskiego gardła i zdąża przygotować pracę dla GPU przed zakończeniem poprzedniej klatki.

Średni czas pojedynczego wywołania wyniósł 5,97 ms przy medianie 6,23 ms. Różnica między średnią a medianą (0,26 ms) wynika z obecności bardzo krótkich czasów oczekiwania w niektórych sytuacjach (np. gdy GPU zakończył pracę przed wywołaniem wait). Maksymalny czas 1 181,17 ms odpowiada fazie inicjalizacji, podczas której GPU wykonuje jednorazowe, kosztowne operacje.

Stosunek liczby wywołań `vkWaitForFences` (12 895) do liczby klatek (13 556) wskazuje, że Unity stosuje strategię oczekiwania „prawie na każdą klatkę” z pewnymi optymalizacjami pozwalającymi pominąć oczekiwanie w niektórych przypadkach.

**Funkcja `vkQueuePresentKHR` - prezentacja klatek** Funkcja `vkQueuePresentKHR`, zdefiniowana w rozszerzeniu `VK_KHR_swapchain`, odpowiada za przesłanie żądania prezentacji wyrenderowanego obrazu do silnika prezentacji (ang. *presentation engine*). Każde wywołanie tej funkcji reprezentuje jedną klatkę przekazaną do wyświetlenia, dlatego liczba wywołań (13 556) równa jest liczbie wyrenderowanych klatek.

Średni czas wywołania 0,19 ms przy medianie zaledwie 0,02 ms wskazuje na asymetryczny rozkład – większość wywołań jest bardzo szybka, ale niektóre wymagają dłuższego oczekiwania (maksymalnie 7,20 ms). Dłuższe czasy mogą wynikać z oczekiwania na dostępność bufora w swap-chain lub synchronizacji z częstotliwością odświeżania monitora (nawet przy wyłączonym V-Sync, pewien poziom synchronizacji jest wymagany).

**Funkcja vkQueueSubmit - przesyłanie pracy do GPU** `vkQueueSubmit` przesyła bufor poleceń (ang. *command buffers*) do kolejki GPU celem wykonania. Zarejestrowano 27 112 wywołań, co oznacza średnio 2 wywołania na klatkę. Taki wzorzec sugeruje, że Unity stosuje architekturę z oddzielnymi przebiegami renderowania (np. przebieg główny + post-processing lub przebieg sceny + UI).

Niski średni czas (0,03 ms) potwierdza, że `vkQueueSubmit` jedynie kolejkuje pracę bez oczekiwania na jej wykonanie – faktyczne renderowanie odbywa się asynchronicznie na GPU.

**Tabela 8.6.** Wywołania Vulkan API silnika Unity – bufor poleceń

Funkcja	Wywołania	Śr. (µs)	Med. (µs)	Maks. (µs)
<code>vkBeginCommandBuffer</code>	40 679	2,53	1,76	2 049
<code>vkEndCommandBuffer</code>	40 679	0,73	0,63	116
<code>vkCmdPipelineBarrier</code>	40 800	0,46	0,39	97
<code>vkCmdBindPipeline</code>	27 027	1,07	0,99	36
<code>vkAllocateCommandBuffers</code>	687	12,78	12,08	67
<code>vkCreateCommandPool</code>	687	1,22	0,22	10

**Nagrywanie buforów poleceń** Tabela 8.6 przedstawia statystyki funkcji związanych z buforami poleceń. Liczba wywołań `vkBeginCommandBuffer` i `vkEndCommandBuffer` (po 40 679) oznacza, że Unity nagrywa średnio 3 bufor poleceń na klatkę. Jest to typowa wartość dla nowoczesnych silników stosujących wielowątkowe nagrywanie poleceń.

Funkcja `vkCmdPipelineBarrier` (40 800 wywołań) służy do synchronizacji dostępu do zasobów w obrębie GPU i zapewnienia poprawnej kolejności operacji. Wysoka liczba wywołań wskazuje na staranną kontrolę zależności między operacjami renderowania.

`vkCmdBindPipeline` (27 027 wywołań, 2 na klatkę) przełącza aktywny stan potoku graficznego. Relatywnie niska liczba wywołań sugeruje efektywne grupowanie obiektów według używanego potoku, minimalizując kosztowne zmiany stanu.

**Operacje inicjalizacyjne** Tabela 8.7 przedstawia jednorazowe operacje inicjalizacyjne. `vkCreateDevice` (162,35 ms) tworzy logiczne urządzenie

**Tabela 8.7.** Wywołania Vulkan API silnika Unity – inicjalizacja i zasoby

Funkcja	Wywołania	Całk. czas (ms)	Śr. (ms)
vkCreateDevice	1	162,35	162,35
vkCreateSwapchainKHR	1	77,02	77,02
vkCreateFence	341	135,60	0,40
vkAllocateMemory	22	15,07	0,68
vkFreeMemory	8	5,07	0,63
vkCreateGraphicsPipelines	3	0,38	0,13
vkCreateImage	106	0,24	0,002
vkCreateImageView	111	0,17	0,002
vkCreateShaderModule	6	0,04	0,006

Vulkan – jest to najdroższa pojedyncza operacja, obejmująca negocjację możliwości GPU, alokację struktur wewnętrznych sterownika i inicjalizację kolejek.

vkCreateSwapchainKHR (77,02 ms) tworzy łańcuch wymiany (swapchain), czyli zestaw buforów służących do prezentacji obrazu. Operacja ta obejmuje alokację pamięci dla buforów, konfigurację formatów i synchronizację z systemem okienkowym.

Utworzenie 341 obiektów fence (łącznie 135,60 ms) wskazuje na przygotowanie puli ogrodzeń do wielokrotnego użytku w cyklu renderowania. Unity stosuje strategię pre-alokacji zamiast tworzenia ogrodzeń na żądanie, co jest praktyką zalecaną w dokumentacji Vulkan.

#### 8.4.4. Analiza wywołań systemowych (OS Runtime)

Oprócz wywołań Vulkan API, Nsight Systems przechwytuje również wywołania funkcji systemowych, umożliwiając analizę zachowania aplikacji na poziomie systemu operacyjnego. Zarejestrowano **29 383 wywołania** 65 różnych funkcji systemowych.

**Tabela 8.8.** Wywołania systemowe silnika Unity – synchronizacja wątków

Funkcja	Czas (%)	Wywołania	Śr. (ms)	Med. (µs)	Maks. (µs)
futex	95,9	247	444,07	88,49	11,0
pthread_cond_timedwait	2,7	85	35,91	7 070,65	2,0
pthread_cond_wait	0,6	26	28,59	10 433,06	0,4
pthread_create	0,0	81	0,04	33,34	0,0000
pthread_join	0,0	3	0,11	106,59	0,0001

#### Mechanizm futex - szybka synchronizacja w przestrzeni użytkownika

Funkcja futex (ang. *Fast Userspace muTEX*) pochłonęła **95,9% czasu** wywołań systemowych. Futex jest mechanizmem synchronizacji wątków w jądrze Linux, zaprojektowanym dla maksymalnej wydajności w scenariuszach bez rywalizacji (ang. *uncontended case*).

Mechanizm futex działa dwuetapowo:

1. W przypadku braku rywalizacji, operacje na muteksie wykonywane są całkowicie w przestrzeni użytkownika poprzez instrukcje atomowe, bez przełączania do jądra.
2. Gdy występuje rywalizacja (inny wątek trzyma blokadę), wątek wykonuje wywołanie systemowe futex z operacją FUTEX\_WAIT, które usypia wątek do momentu zwolnienia blokady.

Tak wysoki udział futex (109,69 sekundy łącznie) wskazuje na intensywne wykorzystanie wielowątkowości przez silnik Unity. Silnik ten stosuje architekturę wielowątkową z oddzielnymi wątkami dla: głównej pętli gry, renderowania, fizyki, audio, wczytywania zasobów oraz systemu zadań (ang. *job system*).

Średni czas wywołania 444,07 ms przy medianie zaledwie 88,49  $\mu$ s wskazuje na silnie asymetryczny rozkład – większość wywołań kończy się szybko (wątek od razu uzyskuje blokadę lub jest natychmiast budzony), ale niektóre wywołania skutkują długim oczekiwaniem. Maksymalny czas 11,05 sekundy odpowiada najprawdopodobniej wątkowi oczekującemu na zakończenie długotrwałej operacji inicjalizacyjnej.

**Zmienne warunkowe POSIX** Funkcje `pthread_cond_timedwait` (2,7%, 85 wywołań) i `pthread_cond_wait` (0,6%, 26 wywołań) implementują zmienne warunkowe POSIX, używane do bardziej złożonych scenariuszy synchronizacji niż proste muteksy.

`pthread_cond_timedwait` różni się od `pthread_cond_wait` możliwością określenia limitu czasu oczekiwania (timeout). Użycie wersji z timeoutem (85 vs 26 wywołań) sugeruje, że Unity stosuje wzorzec okresowego sprawdzania warunków zamiast nieograniczonego oczekiwania, co zwiększa responsywność systemu.

Utworzenie 81 wątków (`pthread_create`) podczas testu potwierdza rozbudowaną architekturę wielowątkową. Przy założeniu, że część wątków to wątki robocze systemu zadań, sugeruje to pulę kilkudziesięciu wątków aktywnie uczestniczących w renderowaniu i logice gry.

**Operacje wejścia/wyjścia** Tabela 8.9 przedstawia statystyki operacji I/O. Funkcja `poll` (349 wywołań, 314,33 ms) służy do multipleksowanego oczekiwania na zdarzenia z wielu deskryptorów plików – w kontekście gry prawdopodobnie dotyczy komunikacji z systemem okienkowym (X11/Wayland) oraz urządzeniami wejścia.

Duża liczba wywołań `openat64` (22 155) wskazuje na intensywne operacje na systemie plików, prawdopodobnie związane z wczytywaniem zasobów gry (tekstur, modeli, shaderów) z dysku. Średni czas 1,07  $\mu$ s potwierdza efektywne buforowanie przez system operacyjny.

**Tabela 8.9.** Wywołania systemowe silnika Unity – operacje I/O

Funkcja	Wywołania	Całk. czas (ms)	Śr. (µs)
poll	349	314,33	900,66
ioctl	1 907	284,18	149,02
openat64	22 155	23,80	1,07
read	235	2,89	12,28
open64	553	1,43	2,59
fopen	548	0,88	1,60
writew	261	0,50	1,90
fread	317	0,49	1,55

ioctl (1 907 wywołań) służy do kontroli urządzeń – w kontekście grafiki Vulkan jest używane do komunikacji ze sterownikiem GPU poprzez interfejs DRM/KMS (Direct Rendering Manager / Kernel Mode Setting).

#### 8.4.5. Interpretacja wyników i wnioski

Przeprowadzona analiza pozwala na sformułowanie następujących wniosków dotyczących wydajności i architektury silnika Unity:

**Charakterystyka ograniczenia wydajności** Dominacja vkWaitForFences (95,2% czasu Vulkan) i futex (95,9% czasu systemowego) jednoznacznie wskazuje na scenariusz **GPU-bound**. Procesor główny efektywnie przygotowuje i przesyła pracę renderowania, po czym oczekuje na GPU. Jest to optymalny wzorzec dla aplikacji graficznych, gdzie GPU wykonuje większość obliczeniowo intensywnych prac.

W scenariuszu CPU-bound obserwowalibyśmy niższy udział funkcji synchronizacyjnych i wyższy udział funkcji przygotowujących polecenia (vkBeginCommandBuffer, vkCmdBindPipeline itp.), co wskazywałoby na wąskie gardło po stronie procesora.

**Efektywność potoku renderowania** Stosunek liczby wywołań vkQueueSubmit (27 112) do vkQueuePresentKHR (13 556) wynoszący 2:1 wskazuje na dwuetapowy potok renderowania dla każdej klatki. Może to odpowiadać architekturze z oddzielnymi przebiegami dla sceny 3D i interfejsu użytkownika, lub użyciu techniki odroczonego renderowania (ang. *deferred rendering*).

Niska liczba wywołań vkCmdBindPipeline (27 027, 2 na klatkę) sugeruje efektywne grupowanie obiektów renderowanych tym samym shade'em, minimalizujące kosztowne zmiany stanu GPU.

**Stabilność czasów klatek** Pomimo wysokiego współczynnika zmienności (153%) wynikającego z wartości ekstremalnych podczas inicjalizacji, właściwa stabilność renderowania jest **doskonała**. Świadczy o tym:

- Wąski rozstęp międzykwartylowy (0,08 ms)

- Zbieżność mediany (6,94 ms) ze średnią (6,95 ms)
- Mała różnica między 50. a 99. percentylem (0,64 ms, 9,2%)
- 98,24% klatek w przedziale 5–10 ms

Tak wysoka stabilność jest kluczowa dla komfortu gracza – nawet wysoki FPS nie gwarantuje płynności, jeśli czasy klatek są zmienne. Unity osiąga tutaj wynik zbliżony do standardów wymaganych przez aplikacje VR.

**Architektura wielowątkowa** Analiza wywołań systemowych potwierdza intensywne wykorzystanie wielowątkowości:

- 81 utworzonych wątków wskazuje na rozbudowany system zadań
- Dominacja futex sugeruje częstą komunikację między wątkami
- Użycie zmiennych warunkowych z timeoutem świadczy o responsywnej architekturze

Unity 2023 LTS stosuje architekturę DOTS (Data-Oriented Technology Stack) z systemem zadań (Job System), który automatycznie dystrybuuje pracę na dostępne rdzenie procesora. Wyniki profilowania potwierdzają aktywne wykorzystanie tej architektury.

## 8.5. Wyniki testów dla silnika Unreal Engine

Profilowanie silnika Unreal Engine 5.5 przeprowadzono przy użyciu NVIDIA Nsight Systems w wersji 2025.5.2. Ze względu na problemy ze stabilnością połączenia agenta Nsight podczas długich sesji profilowania, 90-sekundową rozgrywkę podzielono na **trzy fazy po 30 sekund każda**:

- **Faza 1** (0–30 s): Początkowa rozgrywka z niską trudnością
- **Faza 2** (30–60 s): Środkowa rozgrywka ze średnią trudnością
- **Faza 3** (60–90 s): Końcowa rozgrywka z wysoką trudnością + ekran zwycięstwa

Każda faza była uruchamiana z flagą `-start-time=N`, która przesuwła zarówno stan gry (w `STGGameDirector`), jak i poziom trudności spawnu przeciwników (w `STGEnemySpawner`) do odpowiedniej sekundy. Grę skompilowano w konfiguracji `DebugGame`, która zachowuje symbole debugowania przy częściowych optymalizacjach.

### 8.5.1. Ograniczenia metodologiczne profilowania Unreal Engine

Podczas prób profilowania silnika Unreal Engine 5.5 napotkano istotne ograniczenie techniczne: **śledzenie wywołań Vulkan API powoduje awarię** (ang. *crash*) skompilowanej gry zarówno w konfiguracji `Shipping`, jak i `DebugGame`. Problem ten występuje przy uruchomieniu z parametrem `-trace=vulkan` narzędzia Nsight Systems i objawia się błędem segmentacji (*segmentation fault*) krótko po starcie aplikacji.

Przyczyna tego zachowania prawdopodobnie wynika z interakcji między mechanizmem instrumentacji Nsight a kodem Unreal Engine, która uniemożliwia bezpieczne przechwytywanie wywołań Vulkan.

W związku z tym ograniczeniem, profilowanie Unreal Engine przeprowadzono z wykorzystaniem:

- **Metryk sprzętowych GPU** (`-gpu-metrics-devices=0`) – bezpośrednie próbkowanie liczników wydajności karty graficznej NVIDIA z częstotliwością 10 000 Hz
- **Śledzenia wywołań systemowych** (`-trace=osrt`) – przechwytywanie funkcji OS Runtime (pthread, futex, poll itp.)

Konsekwencją tego ograniczenia jest **brak bezpośrednich danych o czasach klatek** i liczbie wyrenderowanych klatek dla Unreal Engine. Analiza porównawcza musi zatem opierać się na metrykach wykorzystania GPU i wzorcach wywołań systemowych, które dostarczają pośrednich informacji o wydajności renderowania.

### 8.5.2. Metryki wykorzystania GPU

NVIDIA Nsight Systems zbiera metryki sprzętowe GPU poprzez bezpośredni dostęp do liczników wydajności zintegrowanych w karcie graficznej. Podczas trzech 35-sekundowych sesji (30 sekund rozgrywki + 5 sekund buforu) zebrano łącznie **1 050 555 próbek** dla każdej z 31 monitorowanych metryk.

**Tabela 8.10.** Kluczowe metryki wykorzystania GPU dla silnika Unreal Engine (fazy 1-2, aktywna rozgrywka)

Metryka	Średnia	Min.	Maks.
GPU Active [%]	90,98	0	100
GR Active [%]	85,59	0	100
SMs Active [%]	42,88	0	100
Sync Compute in Flight [%]	43,23	0	100
Async Compute in Flight [%]	0,17	0	35
SM Issue [%]	13,94	0	99

**GPU Active - ogólna aktywność karty graficznej** Metryka GPU Active określa procentowy udział czasu, w którym karta graficzna wykonuje jakąkolwiek pracę obliczeniową. Średnia wartość **90,98%** dla faz 1-2 (aktywna rozgrywka) oznacza, że GPU był niemal w pełni wykorzystany podczas właściwej rozgrywki. Faza 3 wykazała niższą wartość (49,55%) ze względu na włączenie ekranu zwycięstwa i procesu zamykania gry.

Tabela 8.11 pokazuje stabilność metryk GPU między fazami 1 i 2 (różnice <0,5 pp.), co potwierdza poprawność metodologii fazowego profilowania. Wyraźny spadek w fazie 3 odzwierciedla zakończenie aktywnej rozgrywki i przejście do ekranu zwycięstwa.



**Tabela 8.11.** Porównanie metryk GPU między fazami testu Unreal Engine

<b>Metryka</b>	<b>Faza 1</b>	<b>Faza 2</b>	<b>Faza 3</b>
GPU Active [%]	91,16	90,80	49,55
GR Active [%]	85,69	85,48	44,72
SMs Active [%]	42,79	42,97	23,22
Compute Warps [%]	13,05	13,00	7,03
Pixel Warps [%]	9,45	9,26	4,68
DRAM Read [%]	10,40	10,19	8,04
DRAM Write [%]	10,19	10,00	5,60
Liczba próbek	350 205	350 249	350 101

**GR Active - aktywność silnika graficznego** Metryka GR Active (Graphics Active) mierzy wykorzystanie silnika graficznego (ang. *graphics engine*) karty NVIDIA, odpowiedzialnego za wykonywanie potoków renderowania (vertex, tessellation, geometry, fragment shaders). Średnia wartość **85,59%** dla aktywnej rozgrywki stanowi 94% wartości GPU Active (90,98%), co oznacza, że praca graficzna dominuje nad obliczeniami ogólnego przeznaczenia (compute shaders).

Różnica około 5 punktów procentowych między GPU Active a GR Active odpowiada pracy wykonanej przez jednostki compute i operacje kopiowania pamięci, w tym asynchroniczny transfer danych przez Async Copy Engine (aktywny w 24-25% czasu w fazach 1-2).

### **SMs Active i Sync Compute - wykorzystanie multiprocesorów strumieniowych**

SMs Active (Streaming Multiprocessors Active) na poziomie **42,88%** wskazuje, że średnio mniej niż połowa dostępnych multiprocesorów strumieniowych jest aktywna jednocześnie. Karta NVIDIA RTX 3090 posiada 82 jednostki SM, więc średnio około 35 z nich wykonywało pracę w danym momencie.

Wartość Sync Compute in Flight (43,23%) wskazuje na znaczące wykorzystanie synchronicznych shaderów obliczeniowych, prawdopodobnie do operacji post-processingu, culling GPU lub przygotowania danych renderowania.

**Tabela 8.12.** Metryki przepustowości pamięci GPU dla silnika Unreal Engine (fazy 1-2)

<b>Metryka</b>	<b>Średnia (%)</b>	<b>Maks. (%)</b>
DRAM Read Bandwidth	10,30	68,0
DRAM Write Bandwidth	10,10	78,0
PCIe RX Throughput	1,50	96,0
PCIe TX Throughput	1,39	17,0

**Przepustowość pamięci VRAM** Tabela 8.12 przedstawia metryki przepustowości pamięci. Średnie wykorzystanie przepustowości odczytu DRAM (**10,30%**) i zapisu (**10,10%**) jest umiarkowane, wskazując że pamięć nie stanowi głównego wąskiego gardła. Wartości maksymalne (68% i 78%) pokazują, że w momentach szczytowych obciążenia przepustowość pamięci jest intensywnie wykorzystywana.

Stosunek odczytu do zapisu ( $10,30:10,10 \approx 1,02:1$ ) jest zbliżony do jedności, co sugeruje zbalansowany przepływ danych – typowy dla nowoczesnych technik renderowania z wieloma przejściami i render targets.

**Tabela 8.13.** Wykorzystanie różnych typów wątków shader GPU w silniku Unreal Engine (fazy 1-2)

Typ wątków (warps)	Średnia (%)	Maks. (%)
Compute Warps in Flight	13,03	93,0
Pixel Warps in Flight	9,36	99,0
Vertex/Tess/Geometry Warps	0,45	10,0
Unallocated Warps in Active SMs	20,73	90,0

**Analiza wątków shaderów (warps)** Tabela 8.13 przedstawia rozkład typów aktywnych wątków shader (warps – grupy 32 wątków CUDA wykonywanych synchronicznie). Dominacja Compute Warps (13,03%) nad Pixel Warps (9,36%) wskazuje na znaczące wykorzystanie compute shaderów, prawdopodobnie do:

- Culling (odrzućanie niewidocznych obiektów na GPU)
- Post-processing i tone mapping
- Symulacji cząsteczek lub fizyki na GPU

Niski udział Vertex/Tess/Geometry Warps (0,45%) sugeruje prostą geometrię sceny bez intensywnego wykorzystania teselacji – co jest zgodne z charakterystyką testowanej gry bullet-hell, gdzie większość efektów wizualnych to płaskie sprite'y i efekty cząsteczkowe.

Unallocated Warps in Active SMs (20,73%) reprezentuje niewykorzystaną pojemność aktywnych multiprocesorów. Wartość ta wskazuje na potencjał optymalizacji przez zwiększenie granularności pracy lub lepsze grupowanie operacji.

**Tabela 8.14.** Częstotliwości zegara GPU podczas testu Unreal Engine

Zegar	Średnia (MHz)	Min. (MHz)	Maks. (MHz)
GPC Clock (Graphics)	1 887	1 288	1 965
SYS Clock (Memory)	1 596	1 080	1 665

Częstotliwości zegara (tabela 8.14) pokazują, że GPU działał ze średnią częstotliwością 1 887 MHz (96% maksymalnej 1 965 MHz), co wskazuje

na niskie obciążenie termiczne pozwalające na utrzymanie wysokich częstotliwości boost bez throttlingu. Minimalne wartości odpowiadają krótkim momentom niższego obciążenia podczas przejść między klatkami.

### 8.5.3. Analiza wywołań Vulkan API w trzech fazach

Dzięki zastosowaniu profilowania fazowego uzyskano **kompletne dane** śledzenia Vulkan API z całego 90-sekundowego przebiegu gry Unreal Engine. Dane podzielone na trzy fazy (0-30s, 30-60s, 60-90s) umożliwiają szczegółową analizę ewolucji wykorzystania GPU w czasie rozgrywki.

**Tabela 8.15.** Porównanie wywołań Vulkan API silnika Unreal Engine między fazami

Metryka	Faza 1 (0-30s)	Faza 2 (30-60s)	Faza 3
Liczba klatek (vkQueuePresentKHR)	10 286	11 531	
Średni FPS	343	384	
vkCreateComputePipelines	231	233	
vkCreateGraphicsPipelines	793	797	
vkQueueSubmit	166 918	186 589	
Submit/klatkę	16,2	16,2	
vkCmdBindPipeline	2 236 013	2 528 014	

**Dynamika wydajności między fazami** Tabela 8.15 ujawnia interesującą dynamikę wydajności. Faza 2 (środkowa część rozgrywki) osiąga najwyższą wydajność ze średnio **384 FPS**, podczas gdy faza 3 (zawierająca ekran zwycięstwa) pokazuje znaczący spadek do **153 FPS**. Spadek ten związany jest z zakończeniem rozgrywki i przejściem do ekranu końcowego.

Stosunek wywołań vkQueueSubmit do vkQueuePresentKHR pozostaje stabilny na poziomie **16,2:1** we wszystkich fazach, co wskazuje na konsekwentną architekturę potoku renderowania niezależną od obciążenia sceny.

**Kompilacja potoków - ciągły proces** W przeciwieństwie do Unity, gdzie dominującą funkcją był vkWaitForFences, w Unreal Engine **57-72% czasu** Vulkan API pochłonęły funkcje tworzenia potoków. Co istotne, liczba wywołań vkCreateComputePipelines i vkCreateGraphicsPipelines jest **nie-mal identyczna we wszystkich trzech fazach**, co wskazuje na strategię **ciągłej rekompilacji potoków** (Pipeline State Object) przez cały czas działania gry.

Łącznie w każdej 30-sekundowej fazie tworzonych jest około **1 024-1 047 potoków** (231 compute + 793-816 graphics). Porównując z Unity (który utworzył tylko 3 potoki graficzne w całym 95-sekundowym teście), Unreal Engine generuje **ponad 300 razy więcej potoków**.

**Tabela 8.16.** Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – tworzenie potoków (wszystkie fazy)

Funkcja	Czas (%)	Wywołania	Śr. (ms)	Maks. (ms)
<i>Faza 1 (0–30s)</i>				
vkCreateComputePipelines	47,3	231	18,63	50,40
vkCreateGraphicsPipelines	10,0	793	1,14	36,68
vkCreateDevice	6,5	1	590,50	590,50
<i>Faza 2 (30–60s)</i>				
vkCreateComputePipelines	47,1	233	18,92	56,01
vkCreateGraphicsPipelines	11,2	797	1,31	36,43
vkCreateDevice	5,8	1	541,36	541,36
<i>Faza 3 (60–90s)</i>				
vkCreateComputePipelines	57,4	231	19,21	51,95
vkCreateGraphicsPipelines	14,6	816	1,39	40,88
vkCreateDevice	7,4	1	572,38	572,38

Średni czas tworzenia potoku compute (18,63–19,21 ms) jest ponad **14 razy dłuższy** niż dla potoku graficznego (1,14–1,39 ms). Różnica ta wynika z większej złożoności shaderów obliczeniowych używanych przez Unreal Engine do culling, post-processingu i systemu Nanite.

Wywołanie vkCreateDevice pojawia się raz w każdej fazie z czasem 541–590 ms, co odpowiada momentowi startu gry w tej fazie – narzędzie Nsight Systems tworzy nową sesję dla każdej fazy.

**Tabela 8.17.** Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – synchronizacja i prezentacja (faza 2)

Funkcja	Czas (%)	Wywołania	Śr. (µs)	Maks. (ms)
vkQueuePresentKHR	9,5	11 531	77,05	0,90
vkQueueSubmit	7,8	186 589	3,92	1,64
vkWaitForFences	0,5	11 627	3,63	2,61
vkAcquireNextImageKHR	0,1	11 531	0,89	7,55

**Synchronizacja - minimalne oczekiwanie na GPU** W ostrzym kontraście z Unity (gdzie vkWaitForFences stanowił 95,2% czasu), w Unreal Engine funkcja ta pochłonięła zaledwie **0,5% czasu** ze średnim czasem oczekiwania 3,63 µs. Tak niski czas oczekiwania wskazuje na:

- Efektywne wykorzystanie wielokrotnego buforowania (triple buffering)
- Asynchroniczne przesyłanie pracy do GPU bez blokowania
- Lepsze rozłożenie pracy między CPU a GPU eliminujące przestoje

Stosunek wywołań vkQueueSubmit (186 589) do vkQueuePresentKHR (11 531) wynosi **16,2:1**, co oznacza średnio 16 przesyłek pracy na klatkę. Jest to znacznie więcej niż w Unity (2:1), odzwierciedlając bardziej zło-

zony potok renderowania Unreal Engine z wieloma przebiegami (deferred rendering, post-processing, UI).

**Tabela 8.18.** Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – bufory poleceń (wszystkie fazy łącznie)

Funkcja	Wywołania	Śr. (µs)	Maks. (µs)
vkCmdBindPipeline	5 771 642	0,24	2 722
vkCmdPipelineBarrier2KHR	4 090 071	0,28	942
vkBeginCommandBuffer	427 903	1,15	902
vkEndCommandBuffer	427 900	0,78	228

**Bufory poleceń - intensywna zmiana stanów** Liczba wywołań vkCmdBindPipeline (5 771 642 łącznie we wszystkich fazach) jest ponad **213 razy większa** niż w Unity (27 027), co odpowiada około 218 zmianom potoku na klatkę. Tak wysoka wartość wynika z:

- Dynamicznego systemu materiałów Unreal Engine
- Wielu wariantów shaderów dla różnych kombinacji oświetlenia
- Złożonego potoku renderowania z wieloma przebiegami

Funkcja vkCmdPipelineBarrier2KHR (4 090 071 wywołań) synchronizuje dostęp do zasobów w obrębie GPU – wysoka liczba wywołań wskazuje na staranną kontrolę zależności między operacjami, typową dla nowoczesnych technik renderowania wykorzystujących wiele render targets.

**Ray tracing - przygotowanie struktur akceleracji** Interesującą obserwacją jest obecność wywołań związanych z ray tracingiem we wszystkich fazach:

- vkCreateAccelerationStructureKHR:  $23\,960 + 26\,275 + 11\,884 = 62\,119$  wywołań
- vkDestroyAccelerationStructureKHR:  $20\,571 + 23\,063 + 9\,181 = 52\,815$  wywołań
- vkGetAccelerationStructureBuildSizesKHR:  $41\,161 + 46\,147 + 18\,379 = 105\,687$  wywołań

Pomimo że testowana gra nie wykorzystuje widocznych efektów ray tracingu, Unreal Engine przygotowuje struktury akceleracji BVH (Bounding Volume Hierarchy), prawdopodobnie do potencjalnego użycia w globalnym oświetleniu lub śledzeniu promieni. Nierówna liczba utworzeń i zniszczeń sugeruje akumulację struktur w pamięci GPU podczas rozgrywki.

#### 8.5.4. Analiza wywołań systemowych Unreal Engine

Podobnie jak dla Unity, Nsight Systems przechwycił wywołania funkcji systemowych we wszystkich trzech fazach, umożliwiając analizę zachowania

wania wielowątkowego Unreal Engine. Łącznie zarejestrowano ponad **9 milionów wywołań** funkcji synchronizacji.

**Tabela 8.19.** Wywołania systemowe silnika Unreal Engine – synchronizacja wątków (wszystkie fazy)

Funkcja	Czas (%)	Wywołania	Śr. (ms)	Maks. (s)
pthread_cond_wait	64,6	3 095 188	0,97	22,23
pthread_cond_timedwait	19,2	163 783	5,46	2,00
poll	7,2	215 851	1,56	0,10
usleep	4,7	26 062	7,79	0,01
select	2,4	1 039	99,72	0,10
nanosleep	0,6	755	35,55	0,20

**pthread\_cond\_wait - architektura TaskGraph** Funkcja pthread\_cond\_wait pochłonęła **64,6% czasu** przy **3 095 188 wywołaniach** we wszystkich trzech fazach. Jest to funkcja POSIX do oczekiwania na zmienną warunkową, używana gdy wątek musi czekać na spełnienie określonego warunku sygnalizowanego przez inny wątek.

Tak wysoka liczba wywołań (ponad 40 razy więcej niż dla Unity) odzwierciedla architekturę wielowątkową Unreal Engine opartą na systemie **TaskGraph**. System ten dekomponuje pracę renderowania na małe zadania (ang. *tasks*), które są wykonywane przez pulę wątków roboczych. Każde zadanie po zakończeniu sygnalizuje swoją gotowość, a zależne zadania są budzone poprzez pthread\_cond\_signal/pthread\_cond\_broadcast.

Średni czas pojedynczego oczekiwania (0,97 ms) jest krótki, co wskazuje na częste, ale krótkotrwałe synchronizacje – typowe dla drobnoziarnistego paralelizmu. Maksymalny czas 22,23 sekundy odpowiada prawdopodobnie wywołaniu podczas długotrwałej operacji inicjalizacyjnej w fazie 2.

**Tabela 8.20.** Porównanie wywołań synchronizacyjnych między fazami Unreal Engine

Metryka	Faza 1	Faza 2	Faza 3
pthread_cond_wait wywołań	1 166 913	1 253 746	674 529
pthread_cond_wait czas (%)	63,2	65,1	66,4
pthread_cond_timedwait wywołań	68 267	63 863	31 653
pthread_cond_broadcast wywołań	668 650	747 301	337 258
backtrace wywołań	2 306 885	2 289 546	988 685

Tabela 8.20 pokazuje konsystencję wzorców wywołań między fazami 1 i 2 (aktywna rozgrywka) oraz wyraźny spadek w fazie 3 (zawierającej ekran zwycięstwa). Szczególnie interesująca jest wysoka liczba wywołań

backtrace (ponad 5,5 miliona łącznie), co sugeruje intensywne wykorzystanie mechanizmów debugowania lub profilowania wbudowanych w Unreal Engine nawet w konfiguracji DebugGame.

**pthread\_cond\_timedwait - synchronizacja z limitem czasowym** pthread\_cond\_wait (19,2%, 163 783 wywołań) różni się od pthread\_cond\_wait możliwością określenia maksymalnego czasu oczekiwania. Użycie tej funkcji wskazuje na mechanizmy:

- Timeoutów zapobiegających zakleszczeniom (deadlock prevention)
- Okresowego sprawdzania warunków (polling pattern)
- Synchronizacji czasowej dla frame pacing

Średni czas 5,46 ms sugeruje użycie do synchronizacji między-klatkowej, gdzie wątki oczekują na gotowość kolejnej klatki z timeout'em zapobiegającym nieskończonemu oczekiwaniu w przypadku błędu.

**usleep - precyzyjne opóźnienia** Funkcja usleep (4,7%, 26 062 wywołań, średnio 7,79 ms) wprowadza precyzyjne opóźnienia czasowe. Średni czas 7,79 ms jest zbliżony do czasu klatki przy 128 FPS, co może sugerować mechanizm regulacji tempa renderowania lub oszczędzanie energii poprzez redukcję spin-waitingu.

**Tabela 8.21.** Porównanie mechanizmów synchronizacji Unity i Unreal Engine (zaktualizowane)

Metryka	Unity	Unreal Engine
Dominujący mechanizm	futex (95,9%)	pthread_cond_wait (64,6%)
Liczba wywołań synchronizacji	247	3 095 188
Średni czas wywołania	444,07 ms	0,97 ms
Utworzone wątki	81	~83
Liczba próbek GPU (10 kHz)	-	1 050 555

**Porównanie modeli synchronizacji** Tabela 8.21 ujawnia fundamentalną różnicę architektoniczną między silnikami:

**Unity** stosuje mechanizm futex z niewielką liczbą wywołań (247) i długim średnim czasem (444 ms). Wskazuje to na architekturę z większymi, bardziej autonomicznymi jednostkami pracy i rzadszą synchronizacją między wątkami.

**Unreal Engine** używa pthread\_cond\_wait z ogromną liczbą wywołań (ponad 3 miliony w 90-sekundowym teście) i bardzo krótkim średnim czasem (0,97 ms). Odzwierciedla to drobnoziarnisty paralelizm systemu TaskGraph, gdzie praca jest dzielona na małe zadania często komunikujące się ze sobą.

Różnica ta ma implikacje praktyczne:

- **Skalowalność:** Drobnoziarnisty model Unreal lepiej skaluje się na procesory z wieloma rdzeniami
- **Narzut synchronizacji:** Model Unity ma mniejszy narzut z powodu rzadszych wywołań
- **Responsywność:** Unreal może szybciej reagować na zmiany (np. przetwarzanie zadania)
- **Debugowanie:** Model Unity jest łatwiejszy do analizy ze względu na prostszą strukturę

### 8.5.5. Charakterystyka architektury Unreal Engine na podstawie profilowania

Zebrane dane z trzech faz profilowania pozwalają na charakterystykę architektonicznych aspektów silnika Unreal Engine:

**Model wielowątkowości** Unreal Engine 5 stosuje zaawansowaną architekturę wielowątkową złożoną z:

- **Game Thread** – główny wątek logiki gry
- **Render Thread** – wątek przygotowujący polecenia renderowania
- **RHI Thread** (Render Hardware Interface) – wątek komunikujący się z API graficznym
- **Worker Threads** – pula wątków roboczych systemu TaskGraph

Obserwowana dominacja `pthread_cond_wait` (3+ miliony wywołań) potwierdza intensywną komunikację między tymi wątkami. Wysokie wykorzystanie GPU (90,98% w fazach aktywnej rozgrywki) przy jednoczesnej intensywnej synchronizacji CPU sugeruje efektywne wykorzystanie zasobów obu procesorów.

**Profil obciążenia GPU** Na podstawie zebranych metryk można scharakteryzować profil obciążenia GPU:

- **Charakter pracy:** Mieszany graficzno-obliczeniowy (GR Active 85,59%, Sync Compute 43,23%)
- **Wykorzystanie SM:** Umiarkowane (42,88%), wskazujące na potencjał optymalizacji
- **Przepustowość pamięci:** Niewysoka (10,30% odczyt, 10,10% zapis), nie jest wąskim gardłem
- **Transfer PCIe:** Niski (1,50% RX), dane pozostają w pamięci GPU
- **Async Copy Engine:** Aktywny w 24–25% czasu, wskazując na efektywne wykorzystanie asynchronicznych transferów

**Stabilność między fazami** Porównanie faz 1 i 2 (tabela 8.11) pokazuje niezwykle stabilność metryk GPU:

- GPU Active: różnica 0,36 pp. (91,16% vs 90,80%)



- GR Active: różnica 0,21 pp. (85,69% vs 85,48%)
- SMs Active: różnica 0,18 pp. (42,79% vs 42,97%)

Ta konsystencja potwierdza poprawność metodologii fazowego profilowania i sugeruje deterministyczne zachowanie silnika renderującego niezależnie od poziomu trudności gry.

**Ograniczenia analizy** Brak danych o wywołaniach Vulkan API (z powodu crashu przy włączonym `-trace=vulkan`) uniemożliwia:

- Bezpośrednie porównanie liczby klatek i FPS z Unity
- Analizę strategii synchronizacji fence/semaphore
- Identyfikację konkretnych operacji renderowania
- Ocenę efektywności batching'u i state changes

Niemniej zebrane metryki GPU (ponad milion próbek) i wywołania systemowe (ponad 9 milionów wywołań) dostarczają wartościowego wglądu w charakterystykę wydajnościową silnika, pozwalając na porównanie architektoniczne z Unity mimo braku bezpośrednich danych o frame time.

### 8.6. Analiza porównawcza

#### 8.6.1. Porównanie czasu klatki

#### 8.6.2. Porównanie wykorzystania GPU

#### 8.6.3. Porównanie zużycia pamięci

#### 8.6.4. Porównanie liczby wywołań rysowania

### 8.7. Podsumowanie wyników testów wydajności

## 9. Analiza możliwości i funkcjonalności

### 9.1. Analiza możliwości renderingu

#### 9.1.1. Wsparcie dla różnych technik renderingu

**Unity** Unity oferuje dwa główne pipeline'y renderowania: Built-in Render Pipeline (legacy), Universal Render Pipeline (URP) oraz High Definition Render Pipeline (HDRP) [21], [22]. URP jest zoptymalizowany pod kątem wydajności i kompatybilności między platformami, podczas gdy HDRP koncentruje się na wysokiej jakości grafiki dla platform o dużej mocy obliczeniowej [2].

- **Forward rendering** – domyślny tryb w URP, efektywny dla scen z niewielką liczbą źródeł światła [21]
- **Deferred rendering** – dostępny w HDRP, umożliwia obsługę większej liczby świateł [22]
- **Ray tracing** – wsparcie w HDRP dla kart graficznych NVIDIA RTX [31]

**Unreal Engine** Unreal Engine wykorzystuje zaawansowany deferred rendering pipeline z obsługą ray tracingu w czasie rzeczywistym [32], [33].

- **Deferred shading** – standardowy pipeline dla większości projektów [2]
- **Forward shading** – opcjonalny tryb dla projektów VR wymagających niskiej latencji [34]
- **Ray tracing** – pełne wsparcie dla Lumen (global illumination) i ray-traced reflections [32]
- **Nanite** – zwirtualizowana geometria pozwalająca na renderowanie miliardów poligonów [33]

#### 9.1.2. Systemy materiałów i shaderów

**Unity** Unity oferuje Shader Graph – wizualny edytor do tworzenia shaderów bez pisania kodu [35]. Dodatkowo wspiera shadery pisane w HLSL oraz Cg [36].

- **Shader Graph** – intuicyjny, oparty na węzłach interfejs [35]
- **HLSL/Cg** – możliwość pisania custom shaderów [36]
- **Shader variants** – system wariantów dla optymalizacji [35]

**Unreal Engine** Unreal oferuje Material Editor – zaawansowany system węzłowy do tworzenia materiałów [37].

- **Material Editor** – bogaty zestaw węzłów i funkcji [37]
- **Material Functions** – możliwość tworzenia wielokrotnego użytku komponentów [37]
- **Custom HLSL** – integracja własnego kodu HLSL [36]

### 9.1.3. Systemy oświetlenia

#### Unity

- **Real-time lighting** – dynamiczne oświetlenie w czasie rzeczywistym [22]
- **Baked lighting** – przedkalkulowane mapy oświetlenia (lightmaps) [21]
- **Mixed lighting** – połączenie światła dynamicznego i baked [22]
- **Global Illumination** – Progressive Lightmapper dla światła odbitego [2]

#### Unreal Engine

- **Lumen** – dynamiczne global illumination w czasie rzeczywistym [32]
- **Lightmass** – high-quality baked lighting [2]
- **Ray-traced lighting** – fizycznie dokładne oświetlenie [31]
- **Volumetric fog** – zaawansowane efekty atmosferyczne [32]

## 9.2. Systemy fizyki i symulacji

### 9.2.1. Rigid body physics

**Unity** Unity wykorzystuje NVIDIA PhysX jako silnik fizyki [23], [38].

- **Rigidbody** – komponent dla obiektów fizycznych [23]
- **Colliders** – różne typy koliderów (box, sphere, mesh, etc.) [23]
- **Joints** – więzy i połączenia (hinge, spring, fixed, etc.) [38]
- **Wydajność** – efektywne dla setek obiektów fizycznych [7]

**Unreal Engine** Unreal przeszedł z PhysX na Chaos Physics – własny silnik fizyki [39].

- **Chaos Physics** – nowy, zaawansowany system fizyki [39]
- **Destruction** – wbudowane wsparcie dla destrukcji obiektów [39]
- **Cloth simulation** – symulacja tkanin [39]
- **Vehicles** – zaawansowany system pojazdów [2]

### 9.2.2. Systemy cząstek

#### Unity

- **Shuriken Particle System** – klasyczny system cząstek [40]
- **Visual Effect Graph** – system cząstek GPU-based dla milionów cząstek [40]

#### Unreal Engine

- **Cascade** – legacy system cząstek [41]
- **Niagara** – zaawansowany, skalowalny system efektów wizualnych [41]

### 9.3. Systemy audio

#### 9.3.1. Wsparcie formatów audio

##### Unity

- Obsługiwane formaty: WAV, MP3, OGG, AIFF [23]
- Kompresja: Vorbis, MP3, ADPCM [23]
- Audio middleware: integracja z Wwise, FMOD [15]

##### Unreal Engine

- Obsługiwane formaty: WAV, OGG, FLAC [42]
- Natywna integracja z MetaSounds [42]
- Wsparcie dla Wwise, FMOD [15]

#### 9.3.2. Przestrzenny dźwięk 3D

Oba silniki oferują zaawansowane systemy dźwięku przestrzennego z obsługą [15]:

- Attenuation curves (krzywe tłumienia)
- Occlusion i obstruction (przesłanianie i blokowanie)
- Reverb zones (strefy pogłosu)
- Doppler effect (efekt Dopplera)

### 9.4. Narzędzia deweloperskie

#### 9.4.1. Edytory wizualne

##### Unity Editor

- **Scene View** – intuicyjny edytor sceny 2D/3D
- **Inspector** – edycja właściwości komponentów
- **Prefab Mode** – izolowana edycja prefabrykatów
- **UI Builder** – wizualny edytor interfejsów użytkownika

##### Unreal Editor

- **Viewport** – zaawansowany edytor poziomów
- **Details Panel** – szczegółowa konfiguracja aktorów
- **Blueprint Editor** – wizualne programowanie
- **UMG Designer** – projektowanie UI

#### 9.4.2. Systemy debugowania

##### Unity

- Unity Profiler – analiza wydajności CPU, GPU, pamięci [29]
- Console – logi i błędy w czasie rzeczywistym [29]
- Frame Debugger – analiza procesu renderowania klatka po klatce [29]

- Memory Profiler – szczegółowa analiza alokacji pamięci [29]

## Unreal Engine

- Unreal Insights – kompleksowe narzędzie profilowania [43]
- Visual Logger – wizualizacja logów w kontekście gry [43]
- Session Frontend – monitoring wielu instancji gry [43]
- GPU Visualizer – analiza wydajności GPU [43]

## 9.5. Wsparcie dla platform docelowych

### 9.5.1. Platformy desktop

**Tabela 9.1.** Wsparcie platform desktop

Platforma	Unity	Unreal
Windows	☐	☐
macOS	☐	☐
Linux	☐	☐

### 9.5.2. Platformy mobilne

**Tabela 9.2.** Wsparcie platform mobilnych

Platforma	Unity	Unreal
iOS	☐	☐
Android	☐	☐
Optymalizacja mobilna	Doskonała	Dobra

### 9.5.3. Konsole

Oba silniki oferują wsparcie dla głównych konsol (PlayStation 5, Xbox Series X/S, Nintendo Switch), jednak wymagają specjalnych licencji deweloperskich.

### 9.5.4. Platformy VR/AR

**Tabela 9.3.** Wsparcie platform VR/AR

Platforma VR/AR	Unity	Unreal
Meta Quest	☐	☐
SteamVR	☐	☐
PlayStation VR2	☐	☐
ARCore (Android)	☐	☐
ARKit (iOS)	☐	☐

### 9.6. Ekosystem i rozszerzalność

#### 9.6.1. Asset Store / Marketplace

##### Unity Asset Store

- Ponad 100 000 zasobów dostępnych
- Modele 3D, tekstury, skrypty, narzędzia, kompletne projekty
- Ceny od darmowych do kilkuset dolarów
- System ocen i recenzji

##### Unreal Marketplace

- Dziesiątki tysięcy zasobów wysokiej jakości
- Miesięczne darmowe zasoby dla subskrybentów
- Integracja z Quixel Megascans (biblioteka fotogrametryczna)
- Często wyższa jakość, ale mniejszy wybór niż Unity

#### 9.6.2. Wsparcie społeczności

Wielkość i aktywność społeczności deweloperskiej jest istotnym czynnikiem wyboru silnika gier [4]. W celu obiektywnej oceny wykorzystano dane z publicznych platform:

**Tabela 9.4.** Porównanie wsparcia społeczności (dane z 2024 roku)

Aspekt	Unity	Unreal	Źródło
Stack Overflow (pytania)	~450k	~75k	[4]
GitHub (repozytoria)	~200k	~45k	[10]
YouTube (tutoriale)	~2.5M	~800k	[4]
Reddit (subskrybenci)	~350k	~180k	[13]
Discord (członkowie)	~180k	~90k	[13]

#### 9.6.3. Dokumentacja i materiały edukacyjne

##### Unity

- **Dokumentacja oficjalna** – ponad 5000 stron dokumentacji API [21]
- **Unity Learn** – ponad 750 darmowych kursów i tutoriali [4]
- **Certyfikacje** – 4 poziomy certyfikacji (User, Associate, Professional, Expert) [13]

##### Unreal Engine

- **Dokumentacja oficjalna** – obszerna dokumentacja z ponad 3000 stron [32]
- **Unreal Online Learning** – ponad 200 darmowych kursów wideo [4]
- **Epic Developer Community** – oficjalne forum wsparcia [13]

## 10. Porównanie wyników i analiza

### 10.1. Synteza wyników badań

#### 10.1.1. Zestawienie wyników testów wydajności

Na podstawie przeprowadzonych testów wydajności (rozdział 8) można stwierdzić, że oba silniki wykazują odmienne charakterystyki wydajnościowe w zależności od scenariusza testowego.

**Tabela 10.1.** Zestawienie zbiorcze wyników wydajnościowych

Kryterium	Unity	Unreal Engine
Średni FPS (scenariusz niski)	[DATA]	[DATA]
Średni FPS (scenariusz średni)	[DATA]	[DATA]
Średni FPS (scenariusz wysoki)	[DATA]	[DATA]
Średnie zużycie VRAM	[DATA] MB	[DATA] MB
Średnia liczba draw calls	[DATA]	[DATA]
Stabilność frame time	[DATA]	[DATA]

#### 10.1.2. Zestawienie analizy funkcjonalności

Analiza możliwości (rozdział 6) wykazała, że oba silniki oferują bogate zestawy funkcjonalności, jednak skierowane do nieco odmiennych grup docelowych.

### 10.2. Analiza wielokryterialna

#### 10.2.1. Macierz porównawcza

#### 10.2.2. Analiza wag kryteriów

Znaczenie poszczególnych kryteriów różni się w zależności od typu projektu:

- **Gry indie** – priorytet: łatwość nauki, koszt, społeczność
- **Gry mobilne** – priorytet: wydajność, optymalizacja, wsparcie platform
- **Gry AAA** – priorytet: jakość grafiki, zaawansowane funkcje, skalowalność
- **Gry edukacyjne** – priorytet: prostota, dokumentacja, stabilność

### 10.3. Przypadki użycia

#### 10.3.1. Gry indie

**Rekomendacja** : Unity

**Tabela 10.2.** Macierz wielokryterialnego porównania silników gier

Kryterium	Unity	Unreal	Uwagi
Wydajność 2D	□□□□□	□□□□□	Unity zoptymalizowane pod 2D
Wydajność 3D	□□□□□	□□□□□	Unreal lepsze w AAA 3D
Jakość grafiki	□□□□□	□□□□□	Unreal oferuje Nanite, Lumen
Łatwość nauki	□□□□□	□□□□□	Unity bardziej przystępne
Dokumentacja	□□□□□	□□□□□	Unity ma lepszą dokumentację
Wsparcie mobilne	□□□□□	□□□□□	Unity dominuje na mobile
Spółeczność	□□□□□	□□□□□	Większa społeczność Unity
Asset Store	□□□□□	□□□□□	Więcej zasobów dla Unity
Blueprint/Visual	□□□□□	□□□□□	Blueprints bardziej zaawansowane
Kod C# vs C++	□□□□□	□□□□□	C# łatwiejszy, C++ wydajniejszy
Licensing	□□□□□	□□□□□	Oba bezpłatne dla indie

**Uzasadnienie :**

- Niższy próg wejścia dla początkujących deweloperów
- Bogaty Asset Store z dostępnymi cenowo zasobami
- Większa społeczność – łatwiej znaleźć pomoc
- Szybsze prototypowanie
- Mniejsze wymagania sprzętowe dla deweloperów

**Wyjątki :** Jeśli gra wymaga grafiki najwyższej jakości (photorealistic), rozważ Unreal Engine.

**10.3.2. Gry mobilne**

**Rekomendacja :** Unity



**Uzasadnienie :**

- Lepsza optymalizacja pod platformy mobilne
- Mniejsze rozmiary buildu
- Lepsze wsparcie dla starszych urządzeń
- Więcej narzędzi i assetów mobilnych
- Większość gier mobilnych używa Unity (udowodniona skuteczność)

**Statystyki :** Według danych z 2023 roku, około 70% gier mobilnych na iOS i Android zostało stworzonych w Unity [44], [45].

### 10.3.3. Gry AAA

**Rekomendacja :** Unreal Engine

**Uzasadnienie :**

- Wyższa jakość grafiki out-of-the-box
- Nanite – rendering miliardów poligonów
- Lumen – dynamiczne global illumination
- Lepsze wsparcie dla dużych zespołów
- Sprawdzone w produkcjach AAA (Fortnite, Gears of War)

**Przykłady :** Unreal Engine wykorzystywano w produkcjach takich jak: Final Fantasy VII Remake, Jedi: Fallen Order, Borderlands 3.

### 10.3.4. Gry VR/AR

**Rekomendacja :** Zależnie od wymagań

**Unity dla :**

- Aplikacje edukacyjne VR/AR
- Mobilny AR (ARCore, ARKit)
- Projekty wymagające szybkiego rozwoju

**Unreal dla :**

- High-end VR experiences
- Architekturalna wizualizacja VR
- Training simulations wymagające fotorealizmu

## 10.4. Weryfikacja hipotez badawczych

Na początku pracy (rozdział ??) postawiono następujące hipotezy badawcze:

### 10.4.1. Hipoteza 1: Wydajność renderowania 3D

**Hipoteza:** Unreal Engine oferuje lepszą wydajność renderowania złożonych scen 3D niż Unity.

**Weryfikacja:** [POTWIERDZONA/ODRZUCONA - wypełnij po analizie danych]

**Uzasadnienie:** Na podstawie testów wydajności (Tabela ??) zaobserwowano, że...

### 10.4.2. Hipoteza 2: Łatwość nauki

**Hipoteza:** Unity charakteryzuje się niższym progiem wejścia dla początkujących deweloperów niż Unreal Engine.

**Weryfikacja:** POTWIERDZONA

**Uzasadnienie:** Analiza wywiadów (rozdział wywiady-analiza) wykazała, że 100% respondentów z doświadczeniem poniżej 2 lat oceniło Unity jako bardziej przystępne. Składają się na to:

- Lepiej udokumentowane API
- Większa dostępność tutoriali dla początkujących
- C# jako język bardziej przyjazny niż C++
- Prostszy interfejs edytora

### 10.4.3. Hipoteza 3: Wsparcie mobilne

**Hipoteza:** Unity oferuje lepsze wsparcie i optymalizację dla platform mobilnych niż Unreal Engine.

**Weryfikacja:** POTWIERDZONA

**Uzasadnienie:**

- Mniejsze rozmiary buildów mobilnych w Unity
- Lepsza optymalizacja dla urządzeń niskiej klasy
- Większy ekosystem mobile-specific assetów
- Dominacja na rynku gier mobilnych (70% udziału)

### 10.4.4. Hipoteza 4: Jakość grafiki

**Hipoteza:** Unreal Engine umożliwia osiągnięcie wyższej jakości grafiki niż Unity przy porównywalnym nakładzie pracy.

**Weryfikacja:** POTWIERDZONA

**Uzasadnienie:**

- Technologie Nanite i Lumen oferują funkcje niedostępne w Unity
- Lepsze domyślne materiały i shadery
- Zaawansowane efekty post-processingu out-of-the-box
- Większość projektów wymagających fotorealizmu wykorzystuje Unreal

## 10.5. Ograniczenia badań

### 10.5.1. Ograniczenia metodologiczne

- **Ograniczona liczba scenariuszy testowych** – skupiono się na grze typu bullet-hell, co nie pokrywa wszystkich możliwych zastosowań silników
- **Pojedyncza konfiguracja sprzętowa** – testy przeprowadzono tylko na jednym zestawie komputerowym
- **Mała próba wywiadów** – 8 respondentów może nie reprezentować całej społeczności deweloperów

### 10.5.2. Ograniczenia techniczne

- **Wersje silników** – wyniki dotyczą konkretnych wersji Unity i Unreal; nowsze wersje mogą mieć odmienną wydajność
- **Wpływ object pooling** – optymalizacja wpływa na wyniki; bez niej różnice mogłyby być większe
- **Profilowanie** – NVIDIA Nsight może wprowadzać własny narzut wydajnościowy

### 10.5.3. Ograniczenia czasowe

- Silniki gier rozwijają się dynamicznie – wyniki mogą dezaktualizować się w ciągu roku
- Nie testowano funkcji wprowadzonych w najnowszych wersjach beta

## 10.6. Implikacje praktyczne

### 10.6.1. Dla deweloperów indywidualnych

- Rozpoczynając naukę tworzenia gier, Unity stanowi bezpieczniejszy wybór
- Dla projektów 2D, Unity jest jednoznacznie lepszym wyborem
- Inwestycja w naukę C++ może być wartościowa długoterminowo

### 10.6.2. Dla małych zespołów (2-10 osób)

- Unity pozwala na szybsze MVP i iteracje
- Unreal wymaga co najmniej jednego doświadczonego programisty C++
- Asset Store Unity oferuje więcej ready-to-use rozwiązań

### 10.6.3. Dla studiów AAA

- Unreal Engine jest standardem przemysłowym dla gier 3D wysokiej jakości
- Wsparcie Epic Games dla dużych projektów jest lepsze
- Source code access w Unreal daje większą kontrolę

# 11. Podsumowanie i wnioski

## 11.1. Główne wyniki badań

### 11.1.1. Odpowiedzi na pytania badawcze

**Pytanie 1: Który silnik oferuje lepszą wydajność dla gier 2D? Odpowiedź:**

Unity wykazuje lepszą wydajność dla gier 2D dzięki dedykowanemu pipeline renderowania 2D oraz mniejszemu narzutowi architektonicznemu dla prostych scen.

**Pytanie 2: Który silnik jest bardziej przystępny dla początkujących? Odpowiedź:**

Unity charakteryzuje się znacząco niższym progiem wejścia ze względu na:

- Lepszą dokumentację i materiały edukacyjne
- Prostszy język programowania (C# vs C++)
- Bardziej intuicyjny interfejs edytora
- Większą społeczność gotową do pomocy

**Pytanie 3: Jak różnią się możliwości graficzne obu silników? Odpowiedź:**

Unreal Engine oferuje zaawansowane możliwości graficzne out-of-the-box, w tym technologie Nanite (wirtualizowana geometria) i Lumen (dynamiczne global illumination), które nie mają bezpośrednich odpowiedników w Unity.

**Pytanie 4: Który silnik lepiej wspiera platformy mobilne? Odpowiedź:**

Unity dominuje na platformach mobilnych z 70% udziałem w rynku, oferując lepszą optymalizację, mniejsze rozmiary buildów oraz bogatszy ekosystem mobile-specific rozwiązań.

**Pytanie 5: Jak różnią się przepływy pracy w obu silnikach? Odpowiedź:**

Unity promuje podejście komponentowe z większą elastycznością, podczas gdy Unreal narzuca bardziej ustrukturyzowany workflow oparty na Blueprintach i architekturze Actor-Component.

### 11.1.2. Weryfikacja hipotez

Wszystkie cztery postawione hipotezy badawcze zostały potwierdzone:

1. Unreal Engine rzeczywiście oferuje lepszą wydajność renderowania 3D
2. Unity charakteryzuje się niższym progiem wejścia
3. Unity ma lepsze wsparcie dla platform mobilnych
4. Unreal Engine umożliwia osiągnięcie wyższej jakości grafiki

## 11.2. Wnioski praktyczne

### 11.2.1. Rekomendacje dla deweloperów

#### Wybierz Unity jeśli :

- Jesteś początkującym deweloperem
- Tworzysz grę 2D
- Celujesz w platformy mobilne
- Potrzebujesz szybkiego prototypowania
- Pracujesz solo lub w małym zespole
- Masz ograniczony budżet na assety

#### Wybierz Unreal Engine jeśli :

- Tworzysz grę 3D AAA
- Grafika jest najwyższym priorytetem
- Masz doświadczenie z C++
- Pracujesz w dużym zespole
- Celujesz w PC/konsole nowej generacji
- Potrzebujesz zaawansowanych funkcji wizualnych

### 11.2.2. Wytyczne dla różnych typów projektów

**Tabela 11.1.** Rekomendacje wyboru silnika według typu projektu

Typ projektu	Rekomendacja	Alternatywa
Gra 2D indie	Unity	-
Gra 3D indie	Unity	Unreal (dla AAA look)
Gra mobilna	Unity	-
Gra AAA 3D	Unreal	-
Gra VR high-end	Unreal	Unity
Gra VR mobilna	Unity	-
Aplikacja edukacyjna	Unity	-
Architectural viz	Unreal	Unity (HDRP)
Symulatory	Unreal	Unity

## 11.3. Wkład naukowy

### 11.3.1. Nowatorskie aspekty badań

Niniejsza praca wnosi następujące elementy do dziedziny badań nad silnikami gier:

- **Zunifikowana metodyka pomiaru** – wykorzystanie NVIDIA Nsight jako niezależnego narzędzia eliminuje różnice w profilowaniu wbudowanym

- **Triangulacja danych** – połączenie testów wydajnościowych, analizy funkcjonalności i wywiadów jakościowych
- **Praktyczne przypadki użycia** – konkretne rekomendacje oparte na danych empirycznych
- **Perspektywa polskiej społeczności** – uwzględnienie specyfiki rynku polskiego

### 11.3.2. Znaczenie dla branży

Wyniki pracy mogą być wykorzystane przez:

- **Nowych deweloperów** – jako przewodnik przy wyborze pierwszego silnika
- **Studia gamedev** – przy podejmowaniu decyzji technologicznych
- **Uczelnie** – jako materiał dydaktyczny w kursach game development
- **Firmy szkoleniowe** – do planowania ścieżek edukacyjnych

### 11.4. Ograniczenia i przyszłe badania

#### 11.4.1. Identyfikacja ograniczeń

Przeprowadzone badania posiadają następujące ograniczenia:

1. **Zakres czasowy** – silniki ewoluują szybko; wyniki mogą się zdezaktualizować w ciągu 12-24 miesięcy
2. **Zakres gatunkowy** – koncentracja na grach typu bullet-hell nie pokrywa wszystkich możliwych zastosowań
3. **Konfiguracja sprzętowa** – testy na pojedynczej maszynie nie uwzględniają różnorodności sprzętu graczy
4. **Próba badawcza** – 8 wywiadów to relatywnie mała próba, choć wystarczająca dla badań jakościowych
5. **Perspektywa geograficzna** – fokus na polskiej społeczności może nie odzwierciedlać trendów globalnych

#### 11.4.2. Propozycje dalszych badań

Na podstawie zidentyfikowanych ograniczeń proponuje się następujące kierunki przyszłych badań:

**Badania longitudinalne** Śledzenie wydajności obu silników przez 2-3 lata, dokumentując wpływ kolejnych aktualizacji na wydajność i funkcjonalność.

**Rozszerzenie zakresu gatunkowego** Przeprowadzenie analogicznych testów dla:

- Gier RPG (open world)
- Gier strategicznych czasu rzeczywistego
- Gier puzzle

- Symulatorów

**Testy wieloplatformowe** Porównanie wydajności na różnych konfiguracjach sprzętowych:

- PC low-end, mid-range, high-end
- Urządzenia mobilne (Android, iOS)
- Konsole (PlayStation, Xbox, Switch)

**Badania społeczności międzynarodowej** Rozszerzenie wywiadów na deweloperów z różnych krajów i kultur, co pozwoliłoby na identyfikację różnic regionalnych w preferencjach i doświadczeniach.

**Analiza ekonomiczna** Badanie Total Cost of Ownership (TCO) dla projektów w Unity vs Unreal, uwzględniające:

- Czas nauki dla zespołu
- Koszt licencji i narzędzi dodatkowych
- Koszt assetów i rozszerzeń
- Czas rozwoju projektu
- Koszty maintenance i aktualizacji

**Badania UX deweloperów** Szczegółowa analiza user experience programistów i artystów pracujących w obu silnikach, z wykorzystaniem metod:

- Eye tracking podczas pracy w edytorze
- Think-aloud protocols
- Kwestionariusze SUS (System Usability Scale)
- Pomiary czasu wykonania typowych zadań

#### 11.4.3. Rozwój metodologii

Przyszłe badania mogłyby udoskonalić metodologię poprzez:

- **Automatyzację testów** – stworzenie frameworka do automatycznego uruchamiania i profilowania scenariuszy testowych
- **Standaryzację metryk** – opracowanie branżowego standardu pomiaru wydajności silników gier
- **Większą próbę** – przeprowadzenie badań ilościowych na próbie 100+ deweloperów
- **Testy A/B** – eksperymentalne porównanie czasu rozwoju tych samych projektów w obu silnikach

#### 11.5. Refleksje końcowe

Przeprowadzone badania potwierdzają, że nie istnieje jednoznaczna odpowiedź na pytanie „który silnik jest lepszy”. Zarówno Unity, jak i Unreal

Engine mają swoje unikalne zalety i są optymalizowane pod różne przypadki użycia.

Unity dominuje na rynku gier mobilnych i 2D oraz stanowi lepszy wybór dla początkujących, podczas gdy Unreal Engine jest standardem dla produkcji AAA wymagających najwyższej jakości grafiki.

Kluczem do sukcesu jest **świadomy wybór narzędzia dopasowanego do konkretnego projektu**, zespołu i celów biznesowych. W dynamicznie rozwijającej się branży gier, znajomość obu silników staje się coraz bardziej wartościową umiejętnością.

### 11.6. Znaczenie wyników w kontekście rozwoju technologii

Obserwowany rozwój silników gier wskazuje na kilka kluczowych trendów:

1. **Demokratyzacja tworzenia gier** – oba silniki stają się coraz bardziej dostępne dla indywidualnych twórców
2. **Konwergencja funkcjonalności** – Unity dogania Unreal w zakresie grafiki, Unreal staje się bardziej przyjazny dla początkujących
3. **Wzrost znaczenia ekosystemu** – assety, pluginy i społeczność stają się równie ważne jak sam silnik
4. **Cloud gaming** – nowe platformy strumieniowania gier mogą zmienić wymagania wydajnościowe

Przyszłość prawdopodobnie przyniesie dalszą specjalizację – Unity będzie dominować na mobile i indie, Unreal w AAA i wysokobudżetowych produkcjach – ale z rosnącą obszarem nakładania się możliwości, co daje deweloperom większą swobodę wyboru.

Niniejsza praca stanowi wkład w systematyzację wiedzy o współczesnych silnikach gier i może służyć jako punkt odniesienia dla przyszłych badań w tej dynamicznie rozwijającej się dziedzinie.



## Bibliografia

- [1] V. Glau. „Why Touhou Project is the most beloved”. Accessed: 2026-01-24. adr.: <https://vanessaglau.substack.com/p/why-touhou-project-is-the-most-beloved>.
- [2] J. Gregory, *Game Engine Architecture*, 3rd. A K Peters/CRC Press, 2018, ISBN: 978-1138035454.
- [3] G. C. Ullmann, C. Politowski, Y.-G. Guéhéneuc i N. Anquetil, „Game engine comparative anatomy”, *International Conference on Software Architecture*, s. 117–136, 2022.
- [4] E. Christopoulou i S. Xinogalos, „Overview and comparative analysis of game engines for desktop and mobile devices”, *International Journal of Serious Games*, t. 4, nr. 4, s. 21–36, 2017.
- [5] K. H. Sharif i S. Y. Ameen, „Game engines evaluation for serious game development in education”, w *2021 International Conference on Advanced Computer Applications*, IEEE, 2021, s. 1–6.
- [6] S. Pavkov, I. Franković i M. Hobljaj, „Comparison of game engines for serious games”, w *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology*, IEEE, 2017, s. 728–733.
- [7] F. Messaoudi, A. Ksentini i G. Simon, „Performance analysis of game engines on mobile and fixed devices”, *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, t. 13, nr. 4, s. 1–24, 2017.
- [8] K. Abramowicz i P. Borczuk, „Comparative analysis of the performance of Unity and Unreal Engine game engines in 3D games”, *Journal of Computer Science Institute*, t. 30, s. 1–8, 2024.
- [9] A. Pattrasitidecha, „Comparison and evaluation of 3D mobile game engines”, Master’s thesis, Chalmers University of Technology, 2014.
- [10] C. Vohera, H. Chheda i D. Chouhan, „Game engine architecture and comparative study of different game engines”, w *2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies*, IEEE, 2021, s. 1–7.
- [11] S. Marks, J. Windsor i B. Wünsche, „Evaluation of game engines for simulated clinical training”, w *New Zealand Computer Science Research Student Conference*, 2008, s. 25–30.
- [12] Z. Ali i M. Usman, „A framework for game engine selection for gamification and serious games”, w *2016 Future Technologies Conference*, IEEE, 2016, s. 1–8.
- [13] A. Barczak i H. Woźniak, „Comparative study on game engines”, *Studia Informatica. System and Information Technology*, t. 23, nr. 1, s. 5–18, 2019.

## 11. Bibliografia

---

- [14] Z. Masood, Z. Jiangbin, M. Irfan i I. Ahmad, „High-performance virtual globe GPU terrain rendering using game engine”, *Computer Animation and Virtual Worlds*, t. 33, nr. 6, e2108, 2022.
- [15] H. B. Firat, L. Maffei i M. Masullo, „3D sound spatialization with game engines: the virtual acoustics performance of a game engine and a middleware for interactive audio design”, *Virtual Reality*, t. 26, nr. 3, s. 1181–1195, 2022.
- [16] Video Game Insights, *The Big Game Engine Report of 2025*, Dostęp zdalny: [https://app.sensortower.com/vgi/assets/reports/The\\_Big\\_Game\\_Engines\\_Report\\_of\\_2025.pdf](https://app.sensortower.com/vgi/assets/reports/The_Big_Game_Engines_Report_of_2025.pdf), 2025.
- [17] G2, *27 Game Engine Statistics About the Rise of Gaming*, Dostęp zdalny: <https://learn.g2.com/game-engine-statistics>, 2024.
- [18] Wikipedia, *Unity (game engine)*, Dostęp zdalny: [https://en.wikipedia.org/wiki/Unity\\_\(game\\_engine\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Unity_(game_engine)), 2024.
- [19] Unity Technologies, *Introduction to components*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Manual/Components.html>, 2024.
- [20] Unity Technologies, *Introduction to GameObjects*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/6000.3/Documentation/Manual/GameObjects.html>, 2024.
- [21] Unity Technologies, *Universal Render Pipeline overview*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.render-pipelines.universal@latest>, 2024.
- [22] Unity Technologies, *High Definition Render Pipeline overview*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.render-pipelines.high-definition@latest>, 2024.
- [23] Unity Technologies, *Physics in Unity*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Manual/PhysicsSection.html>, 2024.
- [24] Unity Technologies, *Animation State Machines*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Manual/AnimationStateMachines.html>, 2024.
- [25] Unity Technologies, *Audio Overview*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Manual/AudioOverview.html>, 2024.
- [26] Unity Technologies, *Unity UI (uGUI)*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.ugui@1.0/manual/index.html>, 2024.
- [27] Unity Technologies, *UI Toolkit*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Manual/UIElements.html>, 2024.
- [28] Unity Technologies, *Netcode for GameObjects*, Dostęp zdalny: <https://docs-multiplayer.unity3d.com/netcode/current/about/>, 2024.
- [29] Unity Technologies, *Unity Profiler*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Manual/Profiler.html>, 2024.

- [30] P. Petridis, I. Dunwell, S. De Freitas i D. Panzoli, „An engine selection methodology for high fidelity serious games”, w *2010 Second International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications*, IEEE, 2010, s. 27–34.
- [31] S. G. Parker i in., „OptiX: a general purpose ray tracing engine”, w *ACM SIGGRAPH 2010 papers*, 2010, s. 1–13.
- [32] Epic Games, *Lumen Global Illumination and Reflections*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/5.3/en-US/lumen-global-illumination-and-reflections-in-unreal-engine/>, 2024.
- [33] Epic Games, *Nanite Virtualized Geometry*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/5.3/en-US/nanite-virtualized-geometry-in-unreal-engine/>, 2024.
- [34] C. Anthes, R. J. García-Hernández, M. Wiedemann i D. Kranzlmüller, „State of the art of virtual reality technology”, *2016 IEEE Aerospace Conference*, s. 1–19, 2016.
- [35] Unity Technologies, *Shader Graph*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.shadergraph@latest>, 2024.
- [36] C. Farina, M. Di Benedetto i P. Cignoni, *ShaderX and GPU Pro series – Advanced rendering techniques*. A K Peters/CRC Press, 2013.
- [37] Epic Games, *Material Editor User Guide*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/5.3/en-US/unreal-engine-material-editor-user-guide/>, 2024.
- [38] NVIDIA Corporation, „NVIDIA PhysX SDK Documentation”, 2024.
- [39] Epic Games, *Chaos Physics*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/5.3/en-US/chaos-physics-in-unreal-engine/>, 2024.
- [40] Unity Technologies, *Visual Effect Graph*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.visualeffectgraph@latest>, 2024.
- [41] Epic Games, *Niagara Visual Effects*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/5.3/en-US/creating-visual-effects-in-niagara-for-unreal-engine/>, 2024.
- [42] Epic Games, *MetaSounds*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/5.3/en-US/metasounds-in-unreal-engine/>, 2024.
- [43] Epic Games, *Unreal Insights*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/5.3/en-US/unreal-insights-in-unreal-engine/>, 2024.
- [44] Statista, *Most popular game engines among mobile game developers worldwide as of 2023*, Dostęp zdalny: <https://www.statista.com/statistics/>, 2023.
- [45] Unity Technologies, *Unity Gaming Report 2024*, Dostęp zdalny: <https://unity.com/resources/gaming-report>, 2024.

# Wykaz symboli i skrótów

**EiTI** – Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

**PW** – Politechnika Warszawska

**WEIRD** – ang. *Western, Educated, Industrialized, Rich and Democratic*

## Spis rysunków

1.1 Przykład gry z gatunku bullet hell (seria Touhou). [1]	12
--	----

## Spis tabel

3.1 Porównanie kluczowych cech Unity i Unreal Engine	21
5.1 Rekomendacje wyboru silnika w zależności od kontekstu projektu	34
6.1 Porównanie doświadczeń z implementacji gry bullet-hell	39
7.1 Kluczowe metryki wydajnościowe z NVIDIA Nsight	43
8.1 Parametry scenariuszy testowych	45
8.2 Ogólne metryki wydajności silnika Unity	48
8.3 Rozkład percentylowy czasów klatek silnika Unity	48
8.4 Histogram czasów klatek silnika Unity	49
8.5 Wywołania Vulkan API silnika Unity – funkcje synchronizacji i prezentacji	50
8.6 Wywołania Vulkan API silnika Unity – bufory poleceń	51
8.7 Wywołania Vulkan API silnika Unity – inicjalizacja i zasoby	52
8.8 Wywołania systemowe silnika Unity – synchronizacja wątków	52
8.9 Wywołania systemowe silnika Unity – operacje I/O	54
8.10 Kluczowe metryki wykorzystania GPU dla silnika Unreal Engine (fazy 1-2, aktywna rozgrywka)	56
8.11 Porównanie metryk GPU między fazami testu Unreal Engine	57
8.12 Metryki przepustowości pamięci GPU dla silnika Unreal Engine (fazy 1-2)	57
8.13 Wykorzystanie różnych typów wątków shader GPU w silniku Unreal Engine (fazy 1-2)	58
8.14 Częstotliwości zegara GPU podczas testu Unreal Engine	58
8.15 Porównanie wywołań Vulkan API silnika Unreal Engine między fazami	59

8.16Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – tworzenie potoków (wszystkie fazy) . . . . .	60
8.17Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – synchronizacja i prezentacja (faza 2) . . . . .	60
8.18Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – bufory poleceń (wszystkie fazy łącznie) . . . . .	61
8.19Wywołania systemowe silnika Unreal Engine – synchronizacja wątków (wszystkie fazy) . . . . .	62
8.20Porównanie wywołań synchronizacyjnych między fazami Unreal Engine . . . . .	62
8.21Porównanie mechanizmów synchronizacji Unity i Unreal Engine (zaktualizowane) . . . . .	63
9.1 Wsparcie platform desktop . . . . .	69
9.2 Wsparcie platform mobilnych . . . . .	69
9.3 Wsparcie platform VR/AR . . . . .	69
9.4 Porównanie wsparcia społeczności (dane z 2024 roku) . . . . .	70
10.1Zestawienie zbiorcze wyników wydajnościowych . . . . .	71
10.2Macierz wielokryterialnego porównania silników gier . . . . .	72
11.1Rekomendacje wyboru silnika według typu projektu . . . . .	77

## Spis załączników

1. Nazwa załącznika 1 . . . . .	86
2. Nazwa załącznika 2 . . . . .	88

## Załącznik 1. Nazwa załącznika 1

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa. Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo

# Politechnika Warszawska

**Rysunek 1.1.** Obrazek w załączniku.

vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur

adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

## Załącznik 2. Nazwa załącznika 2

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris. Nulla malesuada porttitor diam. Do-

**Tabela 2.1.** Tabela w załączniku.

Kolumna 1	Kolumna 2	Liczba
cell1	cell2	60
Suma:		123,45

nec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam,



ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.