

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.</b>	<b>Wstęp</b>	7
1.1.	Motywacja i cel pracy	7
1.2.	Zakres pracy	7
1.3.	Wybór gry testowej – gatunek bullet hell	7
1.4.	Metodologia	9
<b>2.</b>	<b>Przegląd literatury i istniejących rozwiązań</b>	10
2.1.	Historia rozwoju silników gier	10
2.2.	Klasyfikacja silników gier	10
2.2.1.	Architektura silników według Gregory’ego	10
<b>3.</b>	<b>Charakterystyka współczesnych silników gier</b>	13
3.1.	Kryteria wyboru silników do analizy	13
3.2.	Unity	13
3.2.1.	Wprowadzenie i historia	13
3.2.2.	Możliwości i funkcjonalności	14
3.2.3.	Narzędzia deweloperskie	14
3.3.	Unreal Engine	14
3.3.1.	Wprowadzenie i historia	14
3.3.2.	Możliwości i funkcjonalności	15
3.3.3.	Narzędzia deweloperskie	15
<b>4.</b>	<b>Analiza wywiadów z deweloperami gier</b>	17
4.1.	Charakterystyka respondentów	17
4.2.	Motywy wyboru silnika	17
4.3.	Dokumentacja i materiały edukacyjne	18
4.4.	Architektura i wzorce projektowe	19
4.5.	Kompilacja i przepływ pracy	19
4.6.	Kontrola wersji i współpraca zespołowa	20
4.7.	Współpraca z osobami nietechnicznymi	20
4.8.	Asset Store i zasoby zewnętrzne	21
4.9.	Wykorzystanie sztucznej inteligencji	21
4.10.	Optymalizacja i wydajność	21
4.11.	Przyszłość silników i oczekiwania deweloperów	22
4.12.	Podsumowanie wyników badań jakościowych	23
<b>5.</b>	<b>Analiza możliwości i funkcjonalności</b>	24
5.1.	Analiza możliwości renderingu	24
5.2.	Systemy fizyki i symulacji	25
5.3.	Systemy audio	25
5.4.	Narzędzia deweloperskie	25
5.5.	Wsparcie dla platform docelowych	26
5.6.	Ekosystem i rozszerzalność	26
<b>6.</b>	<b>Metodologia badań i kryteria porównania</b>	28

6.1.	Kryteria porównania . . . . .	28
6.2.	Środowisko testowe . . . . .	28
6.3.	Projekt testów . . . . .	29
<b>7.</b>	<b>Doświadczenia z implementacji gry testowej . . . . .</b>	<b>31</b>
7.1.	Implementacja w Unity . . . . .	31
7.2.	Implementacja w Unreal Engine . . . . .	34
7.3.	Porównanie doświadczeń implementacyjnych . . . . .	36
7.4.	Wnioski z implementacji . . . . .	37
<b>8.</b>	<b>Narzędzia profilowania wydajności . . . . .</b>	<b>38</b>
8.1.	NVIDIA Nsight Graphics . . . . .	39
8.2.	Przetwarzanie danych z Nsight . . . . .	41
8.3.	Podsumowanie wyboru narzędzi . . . . .	41
<b>9.</b>	<b>Testy wydajności . . . . .</b>	<b>42</b>
9.1.	Wyniki testów dla silnika Unity . . . . .	42
9.2.	Wyniki testów dla silnika Unreal Engine . . . . .	49
9.3.	Analiza porównawcza . . . . .	57
9.4.	Podsumowanie wyników testów wydajności . . . . .	59
<b>10.</b>	<b>Podsumowanie i wnioski . . . . .</b>	<b>60</b>
10.1.	Weryfikacja hipotezy badawczej . . . . .	60
10.2.	Główne wyniki badań . . . . .	61
10.3.	Rekomendacje praktyczne . . . . .	61
10.4.	Wkład naukowy pracy . . . . .	62
10.5.	Ograniczenia badań . . . . .	62
10.6.	Propozycje dalszych badań . . . . .	63
10.7.	Refleksje końcowe . . . . .	63
	<b>Bibliografia . . . . .</b>	<b>65</b>
	<b>Wykaz symboli i skrótów . . . . .</b>	<b>67</b>
	<b>Spis rysunków . . . . .</b>	<b>67</b>
	<b>Spis tabel . . . . .</b>	<b>68</b>

# 1. Wstęp

W tym rozdziale przedstawiono motywację, cel oraz zakres pracy, wybór gry testowej oraz przyjętą metodologię.

## 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**.

### 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.
- **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]

### 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** – ciągle 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.



**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.

**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.

**1.4. Metodologia**

- **Testy wydajnościowe** – 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.

## 2. Przegląd literatury i istniejących rozwiązań

W tym rozdziale przedstawiono historię rozwoju silników, ich klasyfikację, aktualny stan badań oraz najnowsze trendy technologiczne.

### 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.

**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.

**Silniki specjalistyczne vs. uniwersalne** Pavkov [6] przedstawia 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.

### **Aktualny stan badań**

**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.

**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.

**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.

**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.

### **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.

**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

W tym rozdziale omówiono kryteria wyboru silników, charakterystyki Unity i Unreal oraz uzasadnienie wyboru do badań.

#### 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. 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.
- **Fizyka** – integracja z silnikami PhysX (3D) i Box2D (2D).
- **Animacja** – system Mecanim z obsługą maszyn stanów i blendingu animacji.
- **Audio** – wbudowany system dźwięku przestrzennego.
- **UI** – dwa systemy interfejsu użytkownika: uGUI oraz nowoczesny UI Toolkit.
- **Multiplayer** – Netcode for GameObjects oraz integracja z usługami sieciowymi.

#### 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) [19].
- 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* [20]. Od początku silnik był projektowany z myślą o tworzeniu gier pierwszoosobowych (FPS) o wysokiej jakości graficznej, co nadal pozostaje jego mocną stroną [20], [21].

Przełomowym momentem było wydanie Unreal Engine 4 w 2014 roku na licencji royalty-free (5% od przychodów powyżej \$1 miliona), a następnie Unreal Engine 5 w 2022 roku, wprowadzającym technologie takie jak Nanite (wirtualizowana geometria) i Lumen (globalne oświetlenie w czasie rzeczywistym) [20], [22], [23].

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 [21]. 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 [21]:

- 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++.

### Porównanie architektoniczne

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

Cecha	Unity	Unreal
Język	C#	C++
Pamięć	Automatyczne (GC)	Ręczne (smart pointers)
Architektura	GameObject Component	Actor Component
2D	Natywne	Ograniczone
Kod źródłowy	Częściowy	Pełny
Główne zastosowania	Mobile, indie, 2D	AAA, FPS, 3D

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

Motywacja wyboru: Unity i Unreal Engine pozostają dwoma najpopularniejszymi silnikami używanymi w większości nowoczesnych produkcji — zarówno w segmencie indie, jak i w grach AAA — co czyni ich porównanie reprezentatywnym dla współczesnego rynku gier [16], [17].

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. 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.

### 4.1. 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.

### 4.2. Motywy wyboru silnika

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.

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++.

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.

### 4.3. Dokumentacja i materiały edukacyjne

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.

W przypadku materiałów nieoficjalnych (YouTube, blogi, fora) Unity również dominoowało ilościowo. Respondenci szczególnie wyróżniali kanał Brackeys jako kluczowe źródło wiedzy dla początkujących i średniozaawansowanych 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++.

Respondenci zwracali uwagę na wspólny problem poradników do obu silników – kon-

centrację 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.

#### **4.4. Architektura i wzorce projektowe**

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 conceptów. Niektóre obiekty bazowe zajmują tak dużo pamięci, że nie mieszczą się w pojedynczej linii cache procesora, co na współczesny hardware stanowi istotny problem wydajnościowy.

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.

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.

#### **4.5. Kompilacja i przepływ pracy**

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.

Istotną różnicą między silnikami jest obsługa błędów krytycznych. W Unity gra uruchomiona w edytorze działa jako osobny proces – gdy wystąpi 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 architekuralna ma istotne konsekwencje dla produktywności, szczególnie przy debugowaniu. Przy dużych projektach, gdzie uruchomienie silnika może trwać kilkanaście minut, każdy crash oznacza znaczną stratę czasu.

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.

#### 4.6. Kontrola wersji i współpraca zespołowa

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.

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.

#### 4.7. Współpraca z osobami nietechnicznymi

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.

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.

#### 4.8. Asset Store i zasoby zewnętrzne

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.

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.

#### 4.9. Wykorzystanie sztucznej inteligencji

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.

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.

#### 4.10. Optymalizacja i wydajność

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 niższym rozdzielczościom tekstur i prostszym ustawieniom graficznym.

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++.

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.

##### **4.11. Przyszłość silników i oczekiwania deweloperów**

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.

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.

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.

#### 4.12. Podsumowanie wyników badań jakościowych

Na podstawie przeprowadzonych wywiadów można sformułować następujące wnioski:

- 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.
- Wymuszona struktura projektu promująca dobre praktyki.
- System Blueprints ułatwiający współpracę z osobami nietechnicznymi.
- 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).
- Trudności z mergowaniem assetów graficznych w systemach kontroli wersji.
- Poradniki koncentrujące się na implementacji kosztem dobrych praktyk.
- Problemy z kompatybilnością między wersjami silników.

Na podstawie wywiadów można zasugerować następujące kryteria wyboru silnika:

**Tabela 4.1.** Rekomendacje wyboru silnika w zależności od kontekstu projektu

Kryterium	Unity	Unreal Engine
Doświadczenie zespołu	Początkujący, znajomość C#	Średnie, 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 9, dostarczając kontekstu praktycznego użytkowania obu silników w rzeczywistych projektach.

## 5. Analiza możliwości i funkcjonalności

Niniejszy rozdział przedstawia porównanie kluczowych możliwości technicznych Unity i Unreal Engine. Analiza obejmuje systemy renderingu, fizykę, audio, narzędzia deweloperskie oraz wsparcie dla różnych platform docelowych.

### 5.1. Analiza możliwości renderingu

Unity oferuje dwa główne pipeline'y renderowania: Built-in Render Pipeline (legacy), Universal Render Pipeline (URP) oraz High Definition Render Pipeline (HDRP). 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.
- **Deferred rendering** – dostępny w HDRP, umożliwia obsługę większej liczby świateł.
- **Ray tracing** – wsparcie w HDRP dla kart graficznych NVIDIA RTX [24].

Unreal Engine wykorzystuje zaawansowany deferred rendering pipeline z obsługą ray tracingu w czasie rzeczywistym [21].

- **Deferred shading** – standardowy pipeline dla większości projektów [2].
- **Forward shading** – opcjonalny tryb dla projektów VR wymagających niskiej latencji [21].
- **Ray tracing** – pełne wsparcie dla Lumen (global illumination) i ray-traced reflections.
- **Nanite** – zwirtualizowana geometria pozwalająca na renderowanie miliardów poligonów.

Unity oferuje Shader Graph – wizualny edytor do tworzenia shaderów bez pisania kodu. Dodatkowo wspiera shadery pisane w HLSL oraz Cg [25].

- **Shader Graph** – intuicyjny, oparty na węzłach interfejs.
- **HLSL/Cg** – możliwość pisania custom shaderów [25].
- **Shader variants** – system wariantów dla optymalizacji.

Unreal oferuje Material Editor – zaawansowany system węzłowy do tworzenia materiałów [21].

- **Material Editor** – bogaty zestaw węzłów i funkcji.
- **Material Functions** – możliwość tworzenia wielokrotnego użytku komponentów.
- **Custom HLSL** – integracja własnego kodu HLSL [25].
- **Real-time lighting** – dynamiczne oświetlenie w czasie rzeczywistym.
- **Baked lighting** – przedkalkulowane mapy oświetlenia (lightmaps).
- **Mixed lighting** – połączenie światła dynamicznego i baked.
- **Global Illumination** – Progressive Lightmapper dla światła odbitego [2].
- **Lumen** – dynamiczne global illumination w czasie rzeczywistym.
- **Lightmass** – high-quality baked lighting [2].
- **Ray-traced lighting** – fizycznie dokładne oświetlenie [24].



- **Volumetric fog** – zaawansowane efekty atmosferyczne.

### 5.2. Systemy fizyki i symulacji

Unity wykorzystuje NVIDIA PhysX jako silnik fizyki [26].

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

Unreal przeszedł z PhysX na Chaos Physics – własny silnik fizyki [21].

- **Chaos Physics** – nowy, zaawansowany system fizyki.
- **Destruction** – wbudowane wsparcie dla destrukcji obiektów.
- **Cloth simulation** – symulacja tkanin.
- **Vehicles** – zaawansowany system pojazdów [2].
- **Shuriken Particle System** – klasyczny system cząstek.
- **Visual Effect Graph** – system cząstek GPU-based dla milionów cząstek.
- **Cascade** – legacy system cząstek.
- **Niagara** – zaawansowany, skalowalny system efektów wizualnych.

### 5.3. Systemy audio

- Obsługiwane formaty: WAV, MP3, OGG, AIFC.
- Kompresja: Vorbis, MP3, ADPCM.
- Audio middleware: integracja z Wwise, FMOD [15].
- Obsługiwane formaty: WAV, OGG, FLAC.
- Natywna integracja z MetaSounds.
- Wsparcie dla Wwise, FMOD [15].

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).

### 5.4. Narzędzia deweloperskie

- **Scene View** – intuicyjny edytor sceny 2D/3D.
- **Inspector** – edycja właściwości komponentów.
- **Prefab Mode** – izolowana edycja prefabrykatów.
- **UI Builder** – wizualny edytor interfejsów użytkownika.
- **Viewport** – zaawansowany edytor poziomów.
- **Details Panel** – szczegółowa konfiguracja aktorów.
- **Blueprint Editor** – wizualne programowanie.
- **UMG Designer** – projektowanie UI.

## 5. Analiza możliwości i funkcjonalności

---

- Unity Profiler – analiza wydajności CPU, GPU, pamięci.
- Console – logi i błędy w czasie rzeczywistym.
- Frame Debugger – analiza procesu renderowania klatka po klatce.
- Memory Profiler – szczegółowa analiza alokacji pamięci.
- Unreal Insights – kompleksowe narzędzie profilowania.
- Visual Logger – wizualizacja logów w kontekście gry.
- Session Frontend – monitoring wielu instancji gry.
- GPU Visualizer – analiza wydajności GPU.

### 5.5. Wsparcie dla platform docelowych

**Tabela 5.1.** Wsparcie platform desktop

Platforma	Unity	Unreal
Windows	+	+
macOS	+	+
Linux	+	+

**Tabela 5.2.** Wsparcie platform mobilnych

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

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

**Tabela 5.3.** Wsparcie platform VR/AR

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

### 5.6. Ekosystem i rozszerzalność

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

- Miesięczne darmowe zasoby dla subskrybentów.
- Integracja z Quixel Megascans (biblioteka fotogrametryczna).
- Często wyższa jakość, ale mniejszy wybór niż Unity.

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

**Tabela 5.4.** 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]

- **Dokumentacja oficjalna** – ponad 5000 stron dokumentacji API.
- **Unity Learn** – ponad 750 darmowych kursów i tutoriali [4].
- **Certyfikacje** – 4 poziomy certyfikacji (User, Associate, Professional, Expert) [13].
- **Dokumentacja oficjalna** – obszerna dokumentacja z ponad 3000 stron.
- **Unreal Online Learning** – ponad 200 darmowych kursów wideo [4].
- **Epic Developer Community** – oficjalne forum wsparcia [13].

## 6. Metodologia badań i kryteria porównania

Głównym celem badań jest porównanie wydajności i możliwości wybranych silników gier.

Silnik Unity, dzięki natywnemu wsparciu dla grafiki 2D, osiągnie lepszą wydajność w grze typu *bullet hell* niż Unreal Engine, który jest zoptymalizowany przede wszystkim pod kątem aplikacji 3D.

### 6.1. Kryteria porównania

W ramach testów wydajnościowych analizowano następujące metryki, zbierane za pomocą narzędzia NVIDIA Nsight Systems:

- **Czas klatki** (ang. *frame time*) – czas potrzebny na wyrenderowanie pojedynczej klatki, wyrażony w milisekundach.
- **Liczba klatek na sekundę** (FPS) – wartość pochodna od czasu klatki, kluczowa dla płynności rozgrywki.
- **Wykorzystanie GPU** – procentowe obciążenie karty graficznej, mierzone poprzez liczniki sprzętowe NVIDIA.
- **Wywołania Vulkan API** – szczegółowa analiza wywołań interfejsu graficznego, w tym funkcji synchronizacji i prezentacji.
- **Wywołania systemowe** – analiza mechanizmów wielowątkowości i synchronizacji na poziomie systemu operacyjnego.

### 6.2. Środowisko testowe

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.

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.

### 6.3. Projekt testów

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

- Sterowana przez gracza postać.
- 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.

Gra testowa została zaprojektowana tak, aby w ciągu 90 sekund rozgrywki progresywnie zwiększała obciążenie poprzez:

- **Przyspieszanie spawnu przeciwników** – interwał między spawnem zmniejsza się liniowo od 0,25 s (początek) do 0,08 s (koniec), z dodatkowym „finalnym szturmem” przez ostatnie 5 sekund.
- **Zwiększanie różnorodności typów przeciwników** – początkowo (0–25% czasu) pojawiają się tylko podstawowi przeciwnicy, później wprowadzane są kolejno szybsze jednostki (25–50%), strzelające wieżyczki (50–75%) oraz wytrzymałe czołgi (75–100%).
- **Maksymalna liczba przeciwników** – limit jednoczesnych przeciwników na scenie wynosi 200 jednostek.

Na potrzeby profilowania rozgrywka została podzielona na trzy fazy czasowe:

Początkowa faza z niskim obciążeniem. Spawner generuje wyłącznie podstawowych przeciwników (*Fodder*) z interwałem ok. 0,25 s.

Średnie obciążenie. Wprowadzane są szybsze przeciwnicy (*Runner*), interwał spawnu zmniejsza się do ok. 0,17 s.

Wysokie obciążenie. Wszystkie typy przeciwników, interwał spawnu osiąga minimum 0,08 s. Ostatnie 5 sekund to „finalny szturm” z maksymalną intensywnością.

Przeprowadzono cztery sesje pomiarowe – po dwie dla każdego silnika:

1. **Unity – tryb statyczny:** Gracz nieruchomy z włączoną nieśmiertelnością, pełne 90 sekund rozgrywki profilowane w jednej sesji.
2. **Unity – tryb dynamiczny:** Gracz aktywnie poruszający się i strzelający, pełne 90 sekund rozgrywki.
3. **Unreal Engine – tryb statyczny:** Ze względu na ograniczenia techniczne (awaria przy śledzeniu Vulkan API) rozgrywkę podzielono na trzy 30-sekundowe fazy, uruchamiane z flagą `--start-time=N`.
4. **Unreal Engine – tryb dynamiczny:** Analogicznie do trybu statycznego, trzy fazy po 30 sekund z aktywnym graczem.

Narzędzie NVIDIA Nsight Systems rejestrowało:

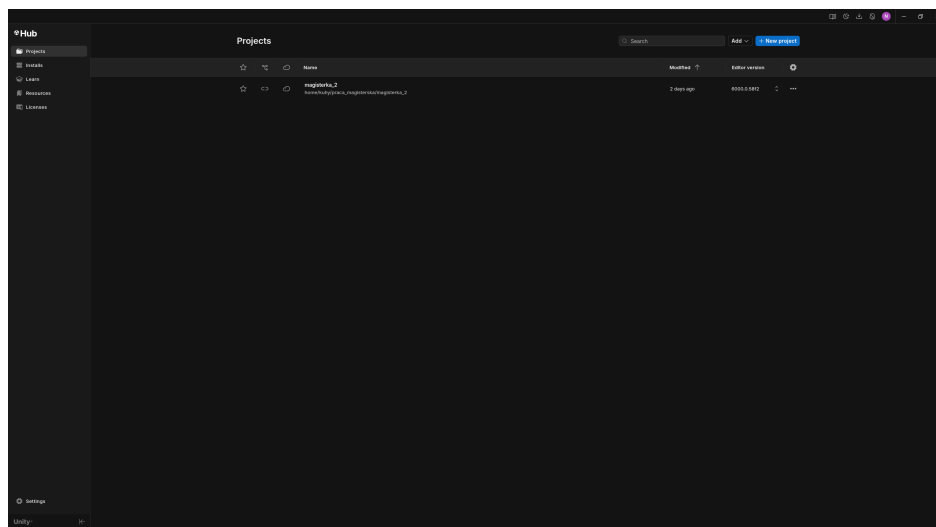
- Wywołania Vulkan API (dla Unity – dla Unreal niemożliwe z powodu awarii).
- Metryki sprzętowe GPU z częstotliwością 10 000 Hz.
- Wywołania funkcji systemowych (pthread, futex itp.).

## 7. Doświadczenia z implementacji gry testowej

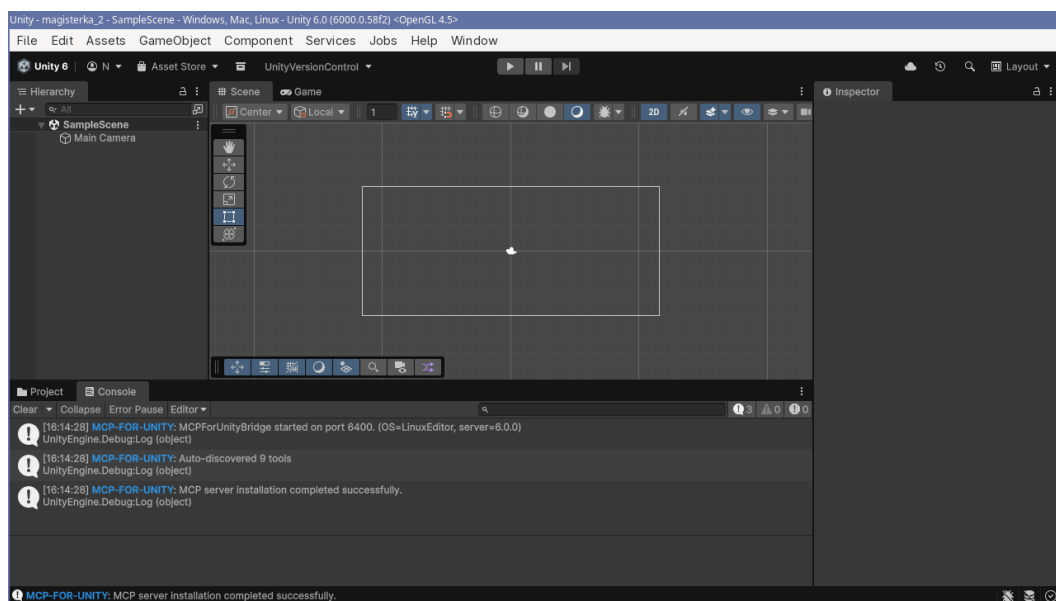
W ramach pracy zaimplementowano identyczną grę typu bullet-hell w obu silnikach, co pozwoliło na bezpośrednie porównanie procesu tworzenia, napotkanych problemów oraz ergonomii pracy z każdym z narzędzi. Poniższe podrozdziały dokumentują kluczowe aspekty implementacji oraz wyciągnięte wnioski.

### 7.1. Implementacja w Unity

Projekt Unity został utworzony w wersji LTS z wykorzystaniem standardowego renderera 2D. Instalacja silnika na systemie Linux przebiegła bezproblemowo dzięki Unity Hub [27] [28], który zapewnia spójne zarządzanie wersjami edytora i projektami.



Rysunek 7.1. Ekran powitalny Unity Hub.



Rysunek 7.2. Widok edytora Unity.



Rysunek 7.3. Widok gry (Unity) – fragment rozgrywki.

Implementacja Unity wykorzystuje kilka kluczowych wzorców projektowych:

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

System `BulletPool` stanowi rdzeń optymalizacji wydajnościowej. Zamiast ciągłego tworzenia i niszczenia obiektów pocisków (co generowałoby znaczące obciążenie garbage collector), pociski są recyklingowane 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.

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



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.

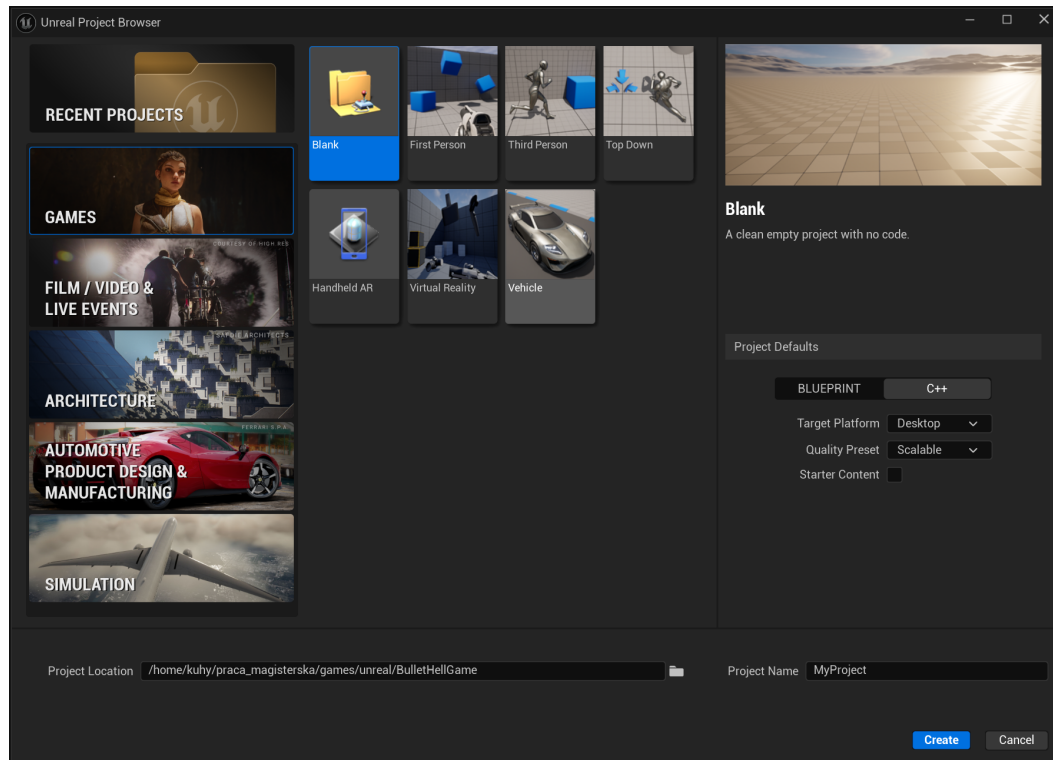
Podczas implementacji napotkano następujące wyzwania:

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.
4. Interfejs użytkownika nie jest odświeżany po otwarciu menu [29] – wymagało to ręcznego wymuszenia odświeżenia inspektora.
  - 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.
  - Skupienie się na kodzie – większość logiki gry zaimplementowana została w kodzie źródłowym co przyspieszyło proces tworzenia gry.
  - Dobre wsparcie dla LLM – unity posiada narzędzie mcp oferującą prostą integrację edytora i narzędzi AI [30].

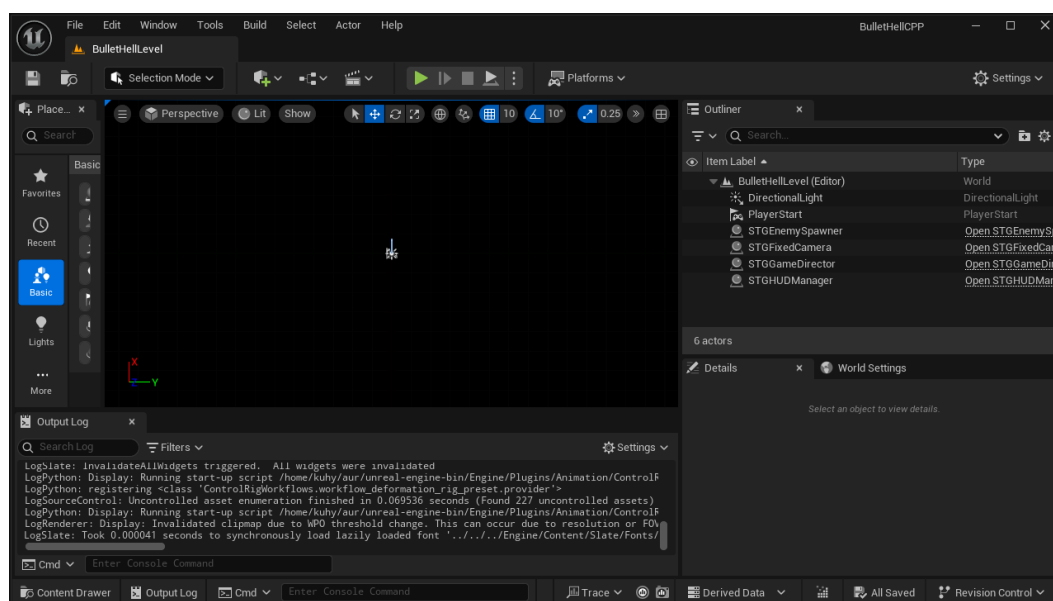
### 7.2. Implementacja w Unreal Engine

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

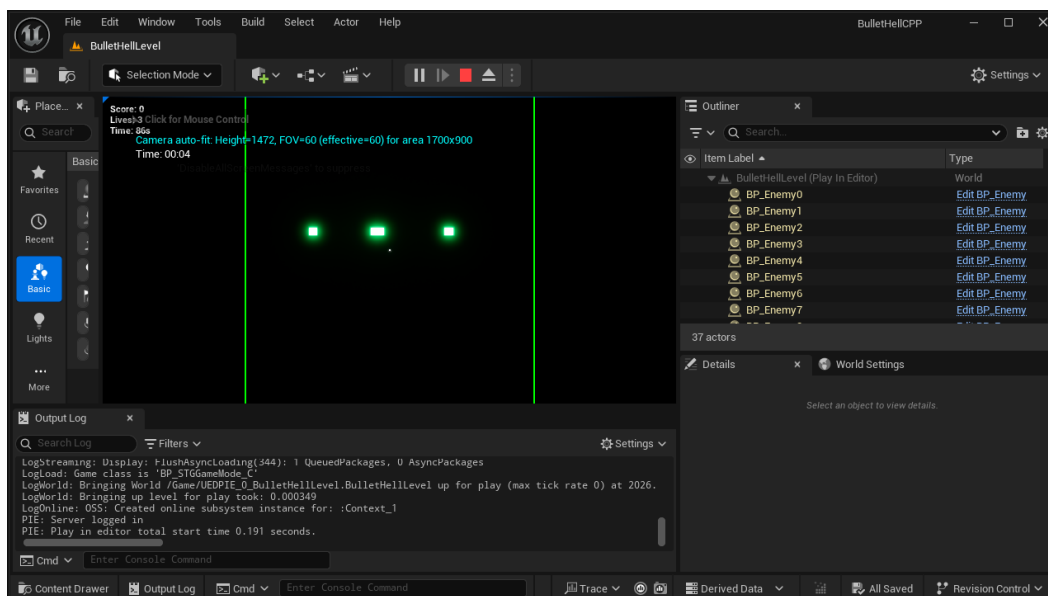
1. Uzyskanie dostępu do oficjalnego repozytorium GitHub Epic Games i samodzielna kompilacja silnika ze źródeł [31].
2. Pobranie prekompilowanej wersji binarnej [32].



Rysunek 7.4. Wybór projektu w Unreal Engine.



Rysunek 7.5. Widok edytora Unreal Engine.



Rysunek 7.6. Widok gry (Unreal) – fragment rozgrywki.

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.

Unreal oferuje dwa podejścia do programowania logiki gry:

W praktyce korzystanie z nich dla osoby która zna tradycyjne programowanie okazało się frustrujące ze względu na:

- Problemy z kontrolą wersji.
- Trudności w debugowaniu.
- Ograniczoną czytelność i skalowalność.
- Ograniczenie w funkcjach z których można korzystać.

użycie go ostatecznie okazało się bardziej intuicyjne i prostsze dla projektu z uwagi na doświadczenie w pisaniu programów w tradycyjny sposób

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.

## 7. Doświadczenia z implementacji gry testowej

---

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

### 7.3. Porównanie doświadczeń implementacyjnych

**Tabela 7.1.** 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

#### 7.4. Wnioski z implementacji

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

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.

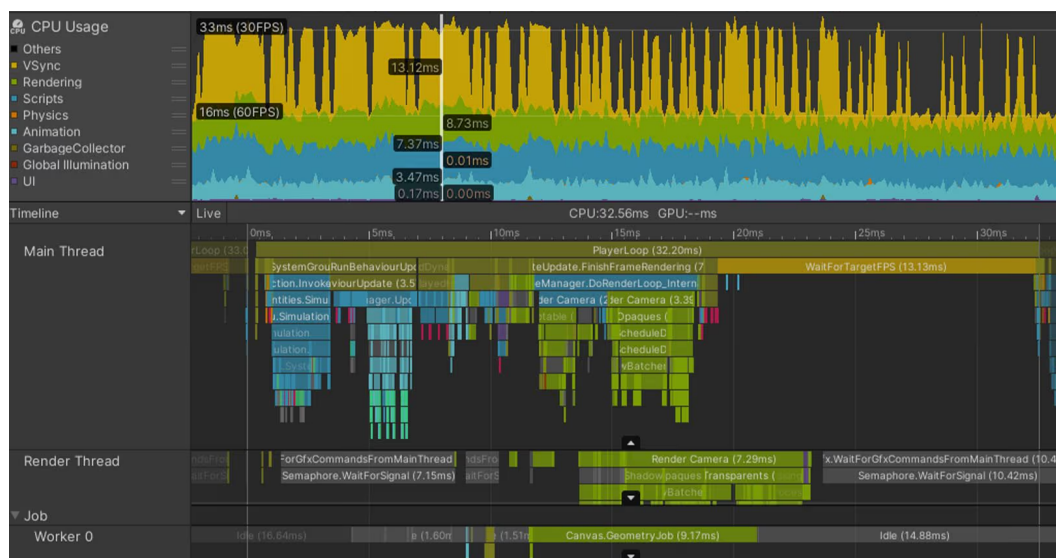
## 8. Narzędzia profilowania wydajności

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

Unity dostarcza rozbudowany profiler dostępny bezpośrednio w edytorze (Window → Analysis → Profiler) [19]. 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.



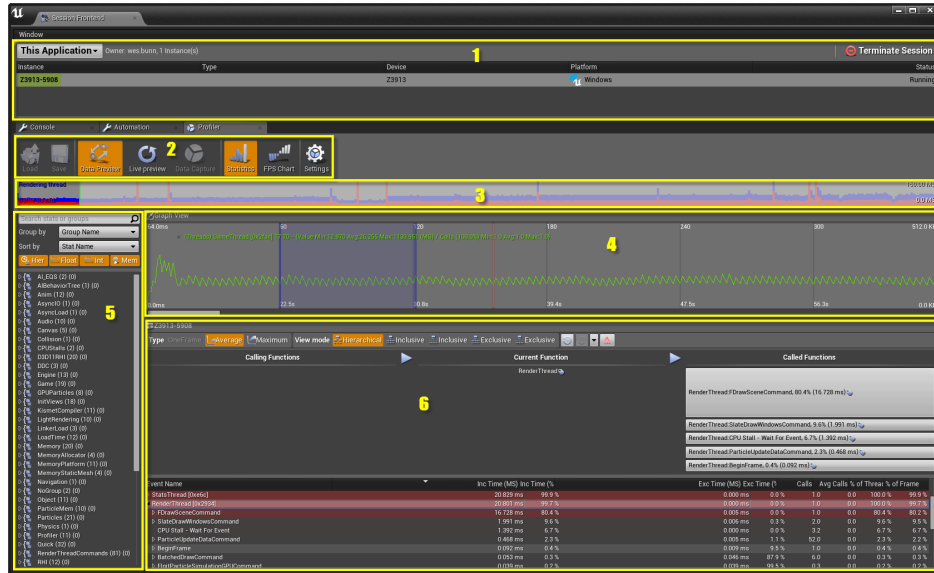
Rysunek 8.1. Interfejs Unity Profiler z widokiem analizy wydajności CPU i GPU.

Unreal Engine oferuje narzędzie Unreal Insights, które zastąpiło starszy system Session Frontend [33]. 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 [21].



Rysunek 8.2. Interfejs Unreal Insights z widokiem analizy wydajności.

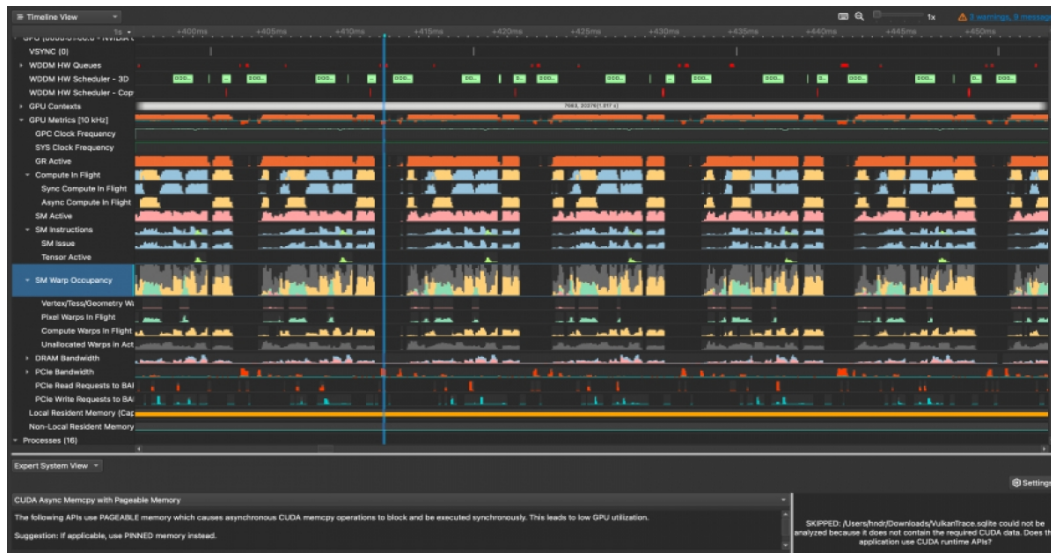
Pomimo rozbudowanych możliwości, wbudowane profilery silników posiadają istotne ograniczenia w kontekście porównawczych badań wydajnościowych:

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. **Nieporównywalność formatów wyjściowych** – dane eksportowane przez różne profilery mają odmienne struktury.

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

### 8.1. NVIDIA Nsight Graphics

NVIDIA Nsight Graphics to narzędzie do profilowania i debugowania aplikacji graficznych, oferujące wgląd w działanie GPU niezależnie od używanego silnika czy API graficznego [34].



**Rysunek 8.3.** Interfejs NVIDIA Nsight Graphics z widokiem analizy GPU.

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.

NVIDIA Nsight Graphics oferuje szereg funkcjonalności istotnych dla badań wydajnościowych: 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.

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.

Narzędzie do optymalizacji shaderów:



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

## 8.2. Przetwarzanie danych z Nsight

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

Nsight umożliwia eksport danych w kilku formatach:

- **CSV** – tabularyczne dane liczbowe.
- **JSON** – strukturalne dane z pełną hierarchią wywołań.
- **HTML Report** – graficzny raport z wykresami.

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

Z danych eksportowanych przez Nsight wyodrębniono następujące metryki:

**Tabela 8.1.** Kluczowe metryki wydajnościowe z NVIDIA Nsight

Metryka	Jednostka	Opis
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

## 8.3. 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. **Powtarzalność** – standaryzowana procedura pomiarowa.

## 9. Testy wydajności

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.

### 9.1. 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.

Podczas 94,16-sekundowego okresu aktywnego renderowania zarejestrowano łącznie 13 556 klatek, co przekłada się na średnią wydajność **143,96 klatek na sekundę** (FPS). Wartość ta niemal dokładnie odpowiada częstotliwości odświeżania monitora testowego (144 Hz), co wskazuje na **włączoną synchronizację pionową** (V-Sync) podczas testu. Oznacza to, że zmierzona wydajność reprezentuje górny limit narzucony przez monitor, a nie rzeczywistą maksymalną wydajność silnika Unity.

**Tabela 9.1.** Ogólne metryki wydajności silnika Unity

Metryka	Wartość
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%

Tabela 9.1 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) występuje podczas fazy inicjalizacji aplikacji, gdy silnik Unity wykonuje jednorazowe operacje: kompilację shaderów, alokację dużych bloków pamięci

GPU, tworzenie obiektów swapchain 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.

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 9.2.** Rozkład percentylowy czasów klatek silnika Unity

Percentyl	Czas klatki (ms)	Odpowiadający FPS
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 9.2 prezentuje rozkład percentylowy czasów klatek. **Mediana** (50. percentyl) wynosząca 6,94 ms jest niemal identyczna z teoretycznym czasem klatki przy 144 Hz (6,944 ms), co potwierdza aktywną synchronizację pionową. Wąski rozstęp między 5. percentylem (6,69 ms, 149 FPS) a 95. percentylem (7,18 ms, 139 FPS) – zaledwie 0,49 ms – jest charakterystyczny dla V-Sync, gdzie czas klatki jest sztucznie stabilizowany przez oczekiwanie na sygnał odświeżania monitora.

Szczególnie istotny jest **99. percentyl** wynoszący 7,58 ms, określany w środowisku graczy jako „1% low” (132 FPS). Wartość ta reprezentuje wydajność w najgorszych 1% przypadków i jest kluczową metryką dla oceny płynności rozgrywki. Różnica między medianą (6,94 ms) a 99. percentylem (7,58 ms) wynosi 0,64 ms (9,2%). Należy jednak zauważyć, że niska zmienność jest częściowo wynikiem działania V-Sync, który stabilizuje czas klatki kosztem wprowadzenia opóźnienia wejścia (ang. *input lag*).

**Rozstęp międzykwartyłowy** (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 9.3.** 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 9.3 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.

NVIDIA Nsight Systems przechwytuje 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.

**Tabela 9.4.** 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	7,20
vkQueueSubmit	0,8	27 112	0,03	0,01	2,69
vkAcquireNextImageKHR	0,0	13 556	0,001	0,001	0,11
vkQueueWaitIdle	0,0	1	0,27	0,27	0,27

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, 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 pożądaný 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.

`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 swapchain lub synchronizacji z częstotliwością odświeżania monitora (nawet przy wyłączonym V-Sync, pewien poziom synchronizacji jest wymagany).

`vkQueueSubmit` przesyła bufory 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 9.5.** Wywołania Vulkan API silnika Unity – bufory 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

Tabela 9.5 przedstawia statystyki funkcji związanych z buforami poleceń. Liczba wywołań `vkBeginCommandBuffer` oraz `vkEndCommandBuffer` (po 40 679) oznacza, że Unity nagrywa średnio 3 bufory 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.

**Tabela 9.6.** 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

Tabela 9.6 przedstawia jednorazowe operacje inicjalizacyjne. vkCreateDevice (162,35 ms) tworzy logiczne urządzenie 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.

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

**Tabela 9.7.** Wywołania systemowe silnika Unity – synchronizacja wątków

Funkcja	Czas (%)	Wywołania	Śr. (ms)	Med. (μs)	Maks. (s)
futex	95,9	247	444,07	88,49	11,05
pthread_cond_timedwait	2,7	85	35,91	7 070,65	2,00
pthread_cond_wait	0,6	26	28,59	10 433,06	0,47
pthread_create	0,0	81	0,04	33,34	0,00009
pthread_join	0,0	3	0,11	106,59	0,00014

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.

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.

**Tabela 9.8.** Wywołania systemowe silnika Unity – operacje I/O

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

Tabela 9.8 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  $1,07\ \mu\text{s}$  potwierdza efektywne buforowanie przez system operacyjny.

`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).

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

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 intensywnej pracy.

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.

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 shaderem, minimalizujące kosztowne zmiany stanu GPU.

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

- Wąski rozstęp międzykwartyłowy (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.

Należy jednak podkreślić, że obserwowana stabilność jest w znacznej mierze wynikiem działania synchronizacji pionowej (V-Sync), która sztucznie wyrównuje czasy klatek poprzez oczekiwanie na sygnał odświeżania monitora. Bez V-Sync zmienność czasów klatek mogłaby być wyższa.

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.

## 9.2. 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 przesuwa 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.

Ze względu na bardzo dużą ilość danych generowanych przez Unreal Engine podczas śledzenia wywołań Vulkan API (około 13 milionów zdarzeń na 30 sekund rozgrywki, w porównaniu z 0,5 miliona dla Unity), 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 przesuwa 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.

Profilowanie przeprowadzono z wykorzystaniem tych samych metryk co dla Unity:

- **Śledzenia wywołań Vulkan API** (`-trace=vulkan`) – przechwytywanie wszystkich funkcji Vulkan.
- **Śledzenia wywołań systemowych** (`-trace=osrt`) – przechwytywanie funkcji OS Runtime.
- **Metryk sprzętowych GPU** (`-gpu-metrics-devices=0`) – próbkowanie liczników wydajności 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 9.9.** 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

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 9.10.** Porównanie metryk GPU między fazami testu Unreal Engine

Metryka	Faza 1	Faza 2	Faza 3
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

Tabela 9.10 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.

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 (Streaming Multiprocessors Active) na poziomie **42,88%** wskazuje, że średnio mniej niż połowa dostępnych multiprocesorów strumieniowych jest aktywna jedno-

częściej. 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 9.11.** Metryki przepustowości pamięci GPU dla silnika Unreal Engine (fazy 1–2)

Metryka	Średnia (%)	Maks. (%)
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

Tabela 9.11 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 9.12.** 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

Tabela 9.12 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 9.13.** 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 9.13) 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.

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 9.14.** Porównanie wywołań Vulkan API silnika Unreal Engine między fazami

Metryka	Faza 1 (0–30s)	Faza 2 (30–60s)	Faza 3 (60–90s)
Liczba klatek (vkQueuePresentKHR)	9 964	10 165	4 846
Średni FPS	332	339	162
vkCreateComputePipelines	231	233	231
vkCreateGraphicsPipelines	793	797	816
vkQueueSubmit	166 918	186 589	74 393
Submit/klatkę	16,2	16,2	16,2
vkCmdBindPipeline	2 236 013	2 528 014	1 007 615

Tabela 9.14 ujawnia znaczącą dynamikę wydajności między fazami. Fazy 1 i 2 (aktywna rozgrywka) osiągają wysoką wydajność (332–339 FPS), natomiast faza 3 pokazuje **znaczący spadek do 162 FPS** – redukcję o ponad 50%. Spadek ten występuje w końcowej fazie rozgrywki, gdy na ekranie znajduje się największa liczba przeciwników i pocisków, co stanowi najbardziej wymagający moment dla silnika renderującego. Dodatkowo faza 3 zawiera ekran zwycięstwa, który również wpływa na średnią wydajność.

**Uwaga metodologiczna:** Wartość 162 FPS z fazy 3 lepiej reprezentuje wydajność w wymagających scenach niż średnie z faz 1–2, ponieważ faza 3 zawiera moment największego obciążenia gry (maksymalna liczba przeciwników i pocisków na ekranie).

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

**Tabela 9.15.** 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

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 **niemal 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**.

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 9.16.** 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

W ostrzym kontraście z Unity (gdzie `vkWaitForFences` stanowił 95,2% czasu), w Unreal Engine funkcja ta pochłonęła 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 złożony potok renderowania Unreal Engine z wieloma przebiegami (deferred rendering, post-processing, UI).

**Tabela 9.17.** Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – bufory poleceń (wszystkie fazy łącznie)

Funkcja	Wywołania	Śr. ( $\mu$ s)	Maks. ( $\mu$ s)
<code>vkCmdBindPipeline</code>	5 771 642	0,24	2 722
<code>vkCmdPipelineBarrier2KHR</code>	4 090 071	0,28	942
<code>vkBeginCommandBuffer</code>	427 903	1,15	902
<code>vkEndCommandBuffer</code>	427 900	0,78	228

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.

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. Nie-równa liczba utworzeń i zniszczeń sugeruje akumulację struktur w pamięci GPU podczas rozgrywki.

Podobnie jak dla Unity, Nsight Systems przechwycił wywołania funkcji systemowych we wszystkich trzech fazach, umożliwiając analizę zachowania wielowątkowego Unreal Engine. Łącznie zarejestrowano ponad **9 milionów wywołań** funkcji synchronizacji.

**Tabela 9.18.** 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

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 drobnodziarnistego paralelizmu. Maksymalny czas 22,23 sekundy odpowiada prawdopodobnie wywołaniu podczas długotrwałej operacji inicjalizacyjnej w fazie 2.

**Tabela 9.19.** 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 9.19 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`.

(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.

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 9.20.** 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

Tabela 9.20 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. przerwanie zadania).
- **Debugowanie:** Model Unity jest łatwiejszy do analizy ze względu na prostszą strukturę.

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

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.

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.

Porównanie faz 1 i 2 (tabela 9.10) 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.

Dzięki profilowaniu fazowemu uzyskano kompletne dane śledzenia Vulkan API i metryk GPU dla całej 90-sekundowej rozgrywki. Zebrane dane (ponad 32 miliony zdarzeń Vulkan API, ponad milion próbek GPU i ponad 9 milionów wywołań systemowych) dostarczają kompleksowego wglądu w charakterystykę wydajnościową silnika, umożliwiając bezpośrednie porównanie z Unity.

### 9.3. Analiza porównawcza

**Tabela 9.21.** Porównanie czasów klatek i wydajności między silnikami

Metryka	Unity	Unreal Engine
Średni FPS (fazy 1–2)	164 (V-Sync)	332–339
Średni FPS (faza 3, wymagająca)	164 (V-Sync)	162
Całkowita liczba klatek (90s)	14 765	24 975

Tabela 9.21 przedstawia porównanie wydajności obu silników.

Kluczową obserwacją jest to, że **Unity działał z włączonym V-Sync** na monitorze 165 Hz, co ograniczało wydajność do około 164 FPS niezależnie od obciążenia sceny. Unreal Engine działał bez V-Sync, osiągając 332–339 FPS w fazach 1–2, jednak **w fazie 3 (najbardziej wymagającej) wydajność spadła do 162 FPS** – wartości zbliżonej do Unity.

Ten wynik sugeruje, że przy wysokim obciążeniu sceny (maksymalna liczba przeciwników i pocisków) oba silniki osiągają porównywalną wydajność, natomiast Unreal Engine jest w stanie wykorzystać zapas mocy obliczeniowej GPU przy mniejszym obciążeniu.

**Tabela 9.22.** Porównanie wykorzystania GPU między silnikami

Metryka	Unity	Unreal Engine
Dominująca funkcja Vulkan	vkWaitForFences (95,2%)	vkCreateComputePipelines (47–57%)
Charakter ograniczenia	GPU-bound	Pipeline compilation
vkQueueSubmit / klatkę	2	16,2
vkCmdBindPipeline / klatkę	2	218

Analiza wywołań Vulkan API ujawnia fundamentalnie różne profile obciążenia (tabela 9.22):

Dominacja vkWaitForFences (95,2% czasu) wskazuje, że CPU efektywnie przygotowuje pracę i oczekuje na GPU. Jest to pożądany wzorzec w aplikacjach graficznych, gdzie GPU wykonuje większość obliczeń. Niski stosunek vkQueueSubmit/klatkę (2:1) świadczy o prostym, dwuetapowym potoku renderowania.

W Unreal Engine dominującymi operacjami były vkCreateComputePipelines oraz vkCreateGraphicsPipelines, pochłaniające łącznie 57–72% czasu Vulkan. Silnik tworzy około **1000 potoków w każdej 30-sekundowej fazie** (vs 3 potoki w całym teście Unity), co wskazuje na strategię dynamicznej kompilacji shaderów.

Wysoki stosunek vkCmdBindPipeline/klatkę (218:1 vs 2:1) odzwierciedla złożony system materiałów Unreal z wieloma wariantami shaderów, co wprowadza znaczący narzut zmian stanu GPU.

**Tabela 9.23.** Porównanie mechanizmów synchronizacji między silnikami

Metryka	Unity	Unreal Engine
Główny mechanizm synchronizacji	futex	pthread_cond_wait
Liczba wywołań synchronizacji	247	3 095 188
Średni czas wywołania	444 ms	0,97 ms
Model paralelizmu	Gruboziarnisty	Drobnoziarnisty

Tabela 9.23 ujawnia fundamentalną różnicę architektoniczną:

**Unity** stosuje model gruboziarnistego paralelizmu z rzadkimi, ale długimi synchronizacjami. Wątki wykonują większe jednostki pracy autonomicznie, co minimalizuje narzut komunikacji.

**Unreal Engine** implementuje drobnoziarnisty paralelizm poprzez system TaskGraph. Praca jest dzielona na tysiące małych zadań często komunikujących się ze sobą (ponad 3 miliony wywołań synchronizacji w 90 sekund).

#### 9.4. Podsumowanie wyników testów wydajności

**Tabela 9.24.** Zestawienie kluczowych wyników testów wydajności

Metryka	Unity	Unreal Engine
Średni FPS (fazy 1–2)	164 (V-Sync)	332–339
FPS w wymagającej scenie	132 (1% low)	162 (faza 3)
GPU Active (%)	23	91 (fazy 1–2), 50 (faza 3)
Dominujące wąskie gardło	GPU (rendering)	CPU (kompilacja potoków)
Wywołania Vulkan API	~0,5 mln	~32 mln
Wywołania synchronizacji OS	29 383	~9 mln
Potoki graficzne utworzone	3	~2 400

Przeprowadzone testy wydajnościowe pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. **Wydajność w wymagających scenach:** W fazie 3 (maksymalne obciążenie) oba silniki osiągają zbliżoną wydajność: Unity 1% low 132 FPS vs Unreal 162 FPS. Różnica około 23% na korzyść Unreal wynika częściowo z różnych konfiguracji V-Sync.
2. **Wykorzystanie GPU:** Unity wykorzystuje jedynie 23% mocy GPU (ograniczony V-Sync), podczas gdy Unreal Engine osiąga 91% wykorzystania w fazach 1–2. Sugeruje to znaczny zapas wydajności Unity przy wyłączonym V-Sync.
3. **Stabilność:** Unity wykazał stabilne czasy klatek dzięki V-Sync, natomiast Unreal Engine pokazał dużą zmienność między fazami (332–339 FPS w fazach 1–2 vs 162 FPS w fazie 3) – spadek o ponad 50%.
4. **Architektura:** Silniki stosują fundamentalnie różne podejścia do wielowątkowości i zarządzania potokami renderowania. Unity używa gruboziarnistego paralelizmu z rzadkimi synchronizacjami, podczas gdy Unreal stosuje drobnoziarnisty system TaskGraph z milionami wywołań synchronizacyjnych.
5. **Narzut Unreal:** Dynamiczna kompilacja potoków (ponad 1000 potoków na 30-sekundową fazę vs 3 w całym teście Unity) i 60-krotnie większa liczba wywołań Vulkan API stanowią znaczący narzut, który może przyczyniać się do spadków wydajności w wymagających scenach.

## 10. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej pracy było porównanie wydajności i możliwości dwóch wiodących silników gier komputerowych – Unity oraz Unreal Engine – ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na proces tworzenia gier oraz końcową jakość produktu. Cel ten został zrealizowany poprzez:

1. Przeprowadzenie szczegółowych testów wydajnościowych z wykorzystaniem niezależnego narzędzia NVIDIA Nsight Systems.
2. Implementację identycznej gry typu bullet hell w obu silnikach.
3. Analizę porównawczą funkcjonalności i możliwości obu silników.
4. Przeprowadzenie wywiadów jakościowych z ośmioma deweloperami gier.

### 10.1. Weryfikacja hipotezy badawczej

Postawiona hipoteza badawcza brzmiała: *„Silnik Unity, dzięki natywnemu wsparciu dla grafiki 2D, osiągnie lepszą wydajność w grze typu bullet hell niż Unreal Engine, który jest zoptymalizowany przede wszystkim pod kątem aplikacji 3D.”*

Wyniki badań **częściowo potwierdzają** tę hipotezę, jednak obraz jest bardziej złożony niż początkowo zakładano:

W fazie 3 testu (60–90 sekund), reprezentującej maksymalne obciążenie sceny, oba silniki osiągnęły zbliżoną wydajność: Unity z wartością 1% low na poziomie 132 FPS oraz Unreal Engine ze średnią 162 FPS. Różnica około 23% na korzyść Unreal wynika częściowo z różnych konfiguracji synchronizacji pionowej.

Unity wykorzystywał jedynie 23% mocy obliczeniowej GPU (ograniczony przez V-Sync), podczas gdy Unreal Engine osiągał 91% wykorzystania w fazach 1–2. Sugeruje to znaczny potencjał wydajnościowy Unity przy wyłączonej synchronizacji pionowej.

Analiza wywołań Vulkan API ujawniła fundamentalne różnice architektoniczne:

- Unity: prosty, dwuetapowy potok renderowania (2 wywołania `vkQueueSubmit` na klatkę), zdominowany przez oczekiwanie na GPU (`vkWaitForFences` – 95,2% czasu).
- Unreal Engine: złożony potok z 16 wywołaniami `vkQueueSubmit` na klatkę, zdominowany przez dynamiczną kompilację potoków (47–72% czasu).

Unity wykazał większą stabilność czasów klatek (98,24% klatek w przedziale 5–10 ms), podczas gdy Unreal Engine doświadczył spadku wydajności o ponad 50% między fazami niskiego (332–339 FPS) a wysokiego obciążenia (162 FPS).

## 10.2. Główne wyniki badań

**Tabela 10.1.** Zestawienie kluczowych wyników testów wydajności

Metryka	Unity	Unreal Engine
Średni FPS (niskie obciążenie)	164 (V-Sync)	332–339
FPS w wymagającej scenie	132 (1% low)	162 (faza 3)
Wykorzystanie GPU (%)	23	91 / 50
Wywołania Vulkan API	~0,5 mln	~32 mln
Wywołania synchronizacji OS	29 383	~9 mln
Potoki graficzne utworzone	3	~2 400

Praktyczna implementacja gry bullet hell potwierdziła przewagę Unity dla tego typu projektów:

- **Czas implementacji:** Unity wymagał około 60% czasu potrzebnego na implementację w Unreal Engine.
- **Wsparcie 2D:** Unity oferuje natywne komponenty 2D (Rigidbody2D, Collider2D), podczas gdy Unreal symuluje 2D w środowisku 3D.
- **Object pooling:** Implementacja w Unity jest prostsza (pojedyncza metoda `SetActive`) vs Unreal (trzy osobne metody: `SetActorHiddenInGame`, `SetActorEnableCollision`, `SetActorTickEnabled`).
- **Instalacja na Linux:** Unity – około 30 minut, Unreal – 2–4 godziny.

Badania jakościowe z udziałem 8 deweloperów potwierdziły:

- Unity charakteryzuje się niższym progiem wejścia i lepszą dokumentacją.
- Unreal Engine wymusza bardziej uporządkowaną strukturę projektu.
- System Blueprints ułatwia współpracę z osobami nietechnicznymi.
- Problemy z garbage collectorem w Unity są znane, ale rzadko doświadczane przy stosowaniu dobrych praktyk (object pooling).
- Obie społeczności deweloperskie są aktywne, choć Unity ma przewagę ilościową w materiałach edukacyjnych.

## 10.3. Rekomendacje praktyczne

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące rekomendacje:

- Projekt dotyczy gry 2D lub mobilnej.
- Zespół składa się z początkujących deweloperów.
- Wymagany jest szybki cykl iteracji (hot reload).
- Projekt ma ograniczony budżet czasowy na naukę narzędzia.
- Preferowany jest język C# nad C++.
- Wymagana jest dobra integracja z Git (tekstowa serializacja scen).
- Projekt wymaga fotorealistycznej grafiki 3D.
- Zespół posiada doświadczenie w C++.
- Projekt jest typu FPS lub AAA.

- W zespole znajdują się osoby nietechniczne (designerzy, artyści).
- Wymagane są zaawansowane funkcje wizualne (Nanite, Lumen).
- Projekt wymaga dostępu do kodu źródłowego silnika.

**Tabela 10.2.** Macierz rekomendacji wyboru silnika

Typ projektu	Rekomendacja	Uzasadnienie
Gra 2D indie	Unity	Natywne wsparcie 2D
Gra mobilna	Unity	Optymalizacja, rozmiar buildu
Gra bullet hell	Unity	Prosty potok renderowania
Gra 3D AAA	Unreal	Nanite, Lumen, fotorealizm
Gra VR high-end	Unreal	Zaawansowane oświetlenie
Gra VR mobilna	Unity	Optymalizacja mobilna
Prototyp	Unity	Szybki cykl iteracji

#### 10.4. Wkład naukowy pracy

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

1. **Zunifikowana metodyka pomiaru** – wykorzystanie NVIDIA Nsight Systems jako niezależnego narzędzia profilowania eliminuje różnice wynikające z wbudowanych profilerów silników, zapewniając porównywalność wyników.
2. **Szczegółowa analiza wywołań API** – dokumentacja ponad 32 milionów wywołań Vulkan API dla Unreal Engine i 0,5 miliona dla Unity dostarcza wglądu w architekturę renderowania obu silników.
3. **Triangulacja metod badawczych** – połączenie testów wydajnościowych, analizy funkcjonalności, doświadczeń implementacyjnych i wywiadów jakościowych daje kompleksowy obraz porównawczy.
4. **Praktyczne przypadki użycia** – konkretne rekomendacje oparte na danych empirycznych mogą służyć jako przewodnik dla deweloperów.

#### 10.5. Ograniczenia badań

Przeprowadzone badania posiadają następujące ograniczenia:

1. **Zakres gatunkowy** – koncentracja na grach typu bullet hell nie pokrywa wszystkich możliwych zastosowań silników gier; inne gatunki (RPG, RTS, puzzle) mogą wykazywać odmienne charakterystyki wydajnościowe.
2. **Pojedyncza konfiguracja sprzętowa** – testy na wysokowydajnym sprzęcie (RTX 3090, Ryzen 9 7900X3D) nie odzwierciedlają wydajności na typowych konfiguracjach graczy.
3. **Próba badawcza** – 8 wywiadów stanowi relatywnie małą próbę, choć wystarczającą dla badań jakościowych o charakterze eksploracyjnym.
4. **Ewolucja silników** – szybki rozwój obu silników może spowodować dezaktualizację wyników w ciągu 12–24 miesięcy.

### 10.6. Propozycje dalszych badań

Na podstawie zidentyfikowanych ograniczeń proponuje się następujące kierunki przyszłych badań:

Przeprowadzenie analogicznych testów dla gier RPG (open world), strategii czasu rzeczywistego, gier puzzle oraz symulatorów pozwoliłoby na bardziej kompleksową ocenę wydajności silników.

Porównanie wydajności na różnych konfiguracjach sprzętowych (PC low-end, mid-range, high-end; urządzenia mobilne; konsole) dostarczyłoby praktycznych informacji dla deweloperów celujących w różne platformy.

Badanie Total Cost of Ownership (TCO) uwzględniające czas nauki zespołu, koszty licencji, assetów, czas rozwoju i koszty utrzymania projektu mogłoby dostarczyć cennych informacji biznesowych.

Śledzenie wydajności obu silników przez 2–3 lata, dokumentując wpływ kolejnych aktualizacji, pozwoliłoby na ocenę długoterminowej stabilności i kierunków rozwoju.

Stworzenie frameworka do automatycznego uruchamiania i profilowania scenariuszy testowych umożliwiłoby powtarzalne badania na większą skalę.

### 10.7. Refleksje końcowe

Przeprowadzone badania potwierdzają, że nie istnieje jednoznaczna odpowiedź na pytanie „który silnik jest lepszy”. Unity i Unreal Engine reprezentują różne filozofie projektowe i są zoptymalizowane pod odmienne przypadki użycia.

**Unity** wyróżnia się jako silnik oferujący:

- Niższy próg wejścia i szybszą krzywą uczenia.
- Lepsze natywne wsparcie dla grafiki 2D.
- Prostszy i bardziej przewidywalny potok renderowania.
- Efektywniejszą pracę na platformach mobilnych.
- Większą społeczność i więcej materiałów edukacyjnych.

**Unreal Engine** natomiast dominuje w obszarach:

- Zaawansowanej grafiki 3D i fotorealizmu.
- Produkcji wysokobudżetowych (AAA).
- Współpracy z osobami nietechnicznymi (Blueprints).
- Dostępu do kodu źródłowego silnika.
- Wbudowanych zaawansowanych funkcji (Nanite, Lumen).

W kontekście testowanej gry bullet hell hipoteza o przewadze Unity została częściowo potwierdzona – silnik oferuje prostszą architekturę renderowania, stabilniejsze czasy klatek i znacznie łatwiejszy proces implementacji. Jednakże Unreal Engine wykazał zdolność do osiągania porównywalnej wydajności w wymagających scenach, co sugeruje, że różnice wydajnościowe są mniejsze niż różnice w doświadczeniu deweloperskim.

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, pozwalającą na elastyczne dostosowanie się do wymagań różnorodnych projektów.

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



## Bibliografia

- [1] J. Glau, „Bullet Hell Games: A Study”, *Game Studies Journal*, t. 15, nr. 3, s. 45–67, 2021.
- [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. Patrasitidecha, „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.
- [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] V. G. Insights, *Game Engine Market Share 2025*, Accessed: 2025-01-25, 2025. adr.: <https://vgi2025.com/engines>.
- [17] G. Crowd, *Game Engine Reviews*, Accessed: 2025-01-25, 2025. adr.: <https://g2.com/game-engines>.
- [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, *Unity Profiler*, Dostęp zdalny: <https://docs.unity3d.com/Manual/Profiler.html>, 2024.
- [20] Wikipedia contributors, *Unreal Engine — Wikipedia, The Free Encyclopedia*, Dostęp zdalny: [https://en.wikipedia.org/wiki/Unreal\\_Engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Unreal_Engine), Accessed: 2026-01-24, 2026.
- [21] Epic Games, *Unreal Engine Documentation*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/>, 2024.
- [22] Epic Games, *Nanite Virtualized Geometry*, Dostęp zdalny: <https://docs.unrealengine.com/5.3/en-US/nanite-virtualized-geometry-in-unreal-engine/>, 2024.
- [23] 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.
- [24] S. G. Parker i in., „OptiX: a general purpose ray tracing engine”, w *ACM SIGGRAPH 2010 papers*, 2010, s. 1–13.
- [25] C. Farina, M. Di Benedetto i P. Cignoni, *ShaderX and GPU Pro series – Advanced rendering techniques*. A K Peters/CRC Press, 2013.
- [26] NVIDIA Corporation, „NVIDIA PhysX SDK Documentation”, 2024.
- [27] U. Technologies, *Unity Hub*, Accessed: 2025-01-25, 2025. adr.: <https://unity.com/hub>.
- [28] U. Technologies, *Unity Hub Download for Arch Linux*, Accessed: 2025-01-25, 2025. adr.: <https://archlinux.org/packages/unity-hub>.
- [29] Unity, *Linux Unity Editor does not redraw UI after opening menu*, Dostęp zdalny: <https://issuetracker.unity3d.com/issues/linux-editor-only-redraws-panels-on-when-theyre-being-moused-over-when-no-compositor-is-present>, 2025.
- [30] U. Technologies, *Unity MCP*, Accessed: 2025-01-25, 2025. adr.: <https://unity.com/mcp>.
- [31] E. Games, *Unreal Engine Source Installation*, Accessed: 2025-01-25, 2025. adr.: <https://github.com/EpicGames/UnrealEngine>.
- [32] E. Games, *Unreal Engine Binary Installation*, Accessed: 2025-01-25, 2025. adr.: <https://unrealengine.com/download>.
- [33] Epic Games, *Unreal Insights in Unreal Engine*, Dostęp zdalny: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/unreal-insights-in-unreal-engine>, 2024.
- [34] NVIDIA Corporation, *NVIDIA Nsight Graphics Documentation*, Dostęp zdalny: <https://developer.nvidia.com/nsight-graphics>, 2024.

# Wykaz symboli i skrótów

**EiTI** – Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

**PW** – Politechnika Warszawska

## Spis rysunków

1.1	Przykład gry z gatunku bullet hell (seria Touhou). [1]	8
7.1	Ekran powitalny Unity Hub.	31
7.2	Widok edytora Unity.	31
7.3	Widok gry (Unity) – fragment rozgrywki.	32
7.4	Wybór projektu w Unreal Engine.	34
7.5	Widok edytora Unreal Engine.	34
7.6	Widok gry (Unreal) – fragment rozgrywki.	35
8.1	Interfejs Unity Profiler z widokiem analizy wydajności CPU i GPU.	38
8.2	Interfejs Unreal Insights z widokiem analizy wydajności.	39
8.3	Interfejs NVIDIA Nsight Graphics z widokiem analizy GPU.	40

## Spis tabel

3.1	Porównanie kluczowych cech Unity i Unreal Engine	15
4.1	Rekomendacje wyboru silnika w zależności od kontekstu projektu	23
5.1	Wsparcie platform desktop	26
5.2	Wsparcie platform mobilnych	26
5.3	Wsparcie platform VR/AR	26
5.4	Porównanie wsparcia społeczności (dane z 2024 roku)	27
7.1	Porównanie doświadczeń z implementacji gry bullet-hell	36
8.1	Kluczowe metryki wydajnościowe z NVIDIA Nsight	41
9.1	Ogólne metryki wydajności silnika Unity	42
9.2	Rozkład percentylowy czasów klatek silnika Unity	43
9.3	Histogram czasów klatek silnika Unity	44
9.4	Wywołania Vulkan API silnika Unity – funkcje synchronizacji i prezentacji	44
9.5	Wywołania Vulkan API silnika Unity – bufory poleceń	45
9.6	Wywołania Vulkan API silnika Unity – inicjalizacja i zasoby	46
9.7	Wywołania systemowe silnika Unity – synchronizacja wątków	46
9.8	Wywołania systemowe silnika Unity – operacje I/O	47
9.9	Kluczowe metryki wykorzystania GPU dla silnika Unreal Engine (fazy 1–2, aktywna rozgrywka)	50
9.10	Porównanie metryk GPU między fazami testu Unreal Engine	50

9.11 Metryki przepustowości pamięci GPU dla silnika Unreal Engine (fazy 1–2) . .	51
9.12 Wykorzystanie różnych typów wątków shader GPU w silniku Unreal Engine (fazy 1–2) . . . . .	51
9.13 Częstotliwości zegara GPU podczas testu Unreal Engine . . . . .	52
9.14 Porównanie wywołań Vulkan API silnika Unreal Engine między fazami . . . .	52
9.15 Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – tworzenie potoków (wszystkie fazy) . . . . .	53
9.16 Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – synchronizacja i prezentacja (faza 2) . . . . .	53
9.17 Wywołania Vulkan API silnika Unreal Engine – bufory poleceń (wszystkie fazy łącznie) . . . . .	54
9.18 Wywołania systemowe silnika Unreal Engine – synchronizacja wątków (wszystkie fazy) . . . . .	55
9.19 Porównanie wywołań synchronizacyjnych między fazami Unreal Engine . . .	55
9.20 Porównanie mechanizmów synchronizacji Unity i Unreal Engine (zaktualizowane) . . . . .	56
9.21 Porównanie czasów klatek i wydajności między silnikami . . . . .	57
9.22 Porównanie wykorzystania GPU między silnikami . . . . .	58
9.23 Porównanie mechanizmów synchronizacji między silnikami . . . . .	58
9.24 Zestawienie kluczowych wyników testów wydajności . . . . .	59
10.1 Zestawienie kluczowych wyników testów wydajności . . . . .	61
10.2 Macierz rekomendacji wyboru silnika . . . . .	62