

## Rozproszona symulacja wirtualna – wielkoskalowe narzędzie do analizy i zarządzania infrastrukturą publiczną

### 1. Wstęp

Infrastruktura publiczna jest jednym z kluczowych i strategicznych elementów działania państwa. Bierze pośredni udział w funkcjonowaniu społeczeństwa oraz gospodarki. Składa się z urzędzeń, budynków oraz instytucji usługowych. Jej podzbiorem jest infrastruktura krytyczna. Zakłócenie jej działania może prowadzić do strat w działalności społeczeństwa i gospodarki oraz uderzyć w bezpieczeństwo państwa<sup>4</sup>. Jednym z priorytetów państwa jest zatem ochrona infrastruktury krytycznej<sup>5</sup>.

Infrastrukturę publiczną można podzielić na wiele sposobów. Jeden z nich to podział na warstwy funkcjonalne. Będą to między innymi elementy odpowiedzialne za gospodarkę wodną, kanalizację, transport środkami komunikacji (drogi), elektryczność, ogrzewanie. Awaria pojedynczego obiektu może wpływać na inne elementy systemu, które są od niego zależne, np. awaria sieci elektrycznej uniemożliwi pracę pompy wody, ogrzewania elektrycznego w domach, komunikacji miejskiej (tramwajów) oraz sygnalizacji świetlnej. W ten sposób awaria może skalować się i dotyczyć nie tylko ulicy, ale również dzielnicy, gminy, miasta lub nawet powiatu.

Problemy, z jakimi spotykają się badacze wykorzystujący narzędzia do analizy i zarządzania infrastrukturą publiczną wskazują na jej nieefektywne wykorzystanie. Przykładowo obliczenie najlepszej inwestycji w zakresie tej infrastruktury jest trudne lub wręcz niemożliwe. Jednym z narzędzi umożliwiających

---

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki.

<sup>2</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki.

<sup>3</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki.

<sup>4</sup> Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym, tekst jedn.: Dz.U. 2017, poz. 209.

<sup>5</sup> <http://rcb.gov.pl/infrastruktura-krytyczna> (data odczytu: 07.11.2017).

rozwiązanie tego rodzaju zagadnień jest symulacja komputerowa<sup>6</sup>. Można ją stosować jako narzędzie analityczne oraz część elementu systemu wspomagania decyzji. Wykorzystując odpowiednio złożony i rzeczywisty model symulacyjny, jesteśmy w stanie dokonać analizy, prognoz i weryfikacji teraźniejszych oraz przyszłych efektów i skutków dokonanych decyzji, zjawisk, czynności oraz zdarzeń. Wykonanie wielu symulacji dla danego zagadnienia umożliwia wsparcie osób, do których należy podjęcie decyzji w danej dziedzinie. Dzięki uzyskaniu odpowiedniej wiedzy możliwe jest również odtworzenie oraz weryfikacja hipotez z przeszłości. W przypadku badań nad epidemią można np. oszacować sposób oraz tempo rozprzestrzeniania się chorób oraz przewidzieć skutki planowanych działań<sup>7</sup>. Symulacja wirtualna pozwala nie tylko na implementację modelu, ale również trójwymiarową wizualizację. Osoba obsługująca symulator widzi skutki wydarzeń, tempo, kierunek propagacji awarii oraz ma możliwość wprowadzania zmian bez przerywania procesu symulacji.

Skala oraz złożoność modelu wpływają na stopień odwzorowania rzeczywistości oraz wymagane zasoby sprzętowe do jego realizacji. Płynność przeprowadzanej symulacji wirtualnej zależy od generowanych klatek na sekundę. Akceptowalną dolną granicą dla gier jest 16 klatek<sup>8</sup>. W przypadku symulacji krokowych w trakcie trwania każdej klatki powinien być obliczony co najmniej jeden krok symulacyjny. W takim kroku symulator musi obsłużyć wszystkie zdarzenia związane z elementami symulacji. W przypadku 16 klatek na sekundę długość kroku symulacyjnego nie może przekroczyć 0,625 sekundy. W przeciwnym przypadku symulacja nie będzie płynna. Maksymalna liczba oraz szczegółowość obiektów, które może obsłużyć w trakcie symulacji, ograniczona jest możliwościami sprzętu, na którym zainstalowany jest symulator. Dla symulacji wysoko rozdzielczych możliwości jednej jednostki są niewystarczające. Zasadne jest zatem wykorzystanie symulacji rozproszonej.

---

<sup>6</sup> Według *Nowej encyklopedii powszechnej PWN* symulacja komputerowa to metoda wnioskowania o zachowaniu się obiektów rzeczywistych na podstawie obserwacji programów komputerowych symulujących to zachowanie, stosowana, gdy bezpośrednie obserwowanie zachowania się obiektu jest trudne lub niemożliwe; *Nowa encyklopedia powszechna PWN*, t. 6, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998, s. 143.

<sup>7</sup> D. Pierzchała, R. Kasprzyk, A. Najgebauer, *Modelowanie i symulacja rozprzestrzeniania się chorób zakaźnych w sieciach społecznych*, „Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne” 2011, nr 8–9, s. 1491–1496.

<sup>8</sup> Z. Joselli, L. Valente, B. Feijó, E. Clua, F.R. Leta, M. Zamith, *A Distributed Architecture for Simulation Environments Based on Game Engine Systems* [w:] F.R. Leta (red.), *Visual Computing: Scientific Visualization and Imaging Systems*, Springer, Heidelberg – Nowy Jork – Dordrecht – Londyn 2014, s. 42.

Celem niniejszego artykułu jest wskazanie rozproszonej symulacji wirtualnej jako efektywnego rozwiązania problemu analizy oraz zarządzania infrastrukturą publiczną poprzez przedstawienie koncepcji oraz przykładowych zastosowań.

## 2. Model infrastruktury publicznej

Problemem symulacji infrastruktury publicznej jest jej wielopłaszczyznowy charakter. Zachodzące zjawiska oraz zdarzenia mogą mieć wpływ na działanie obiektów pośrednio związanych ze źródłem incydentu lub odległych geograficznie. Awaria jednego z elementów może skutkować kaskadową zmianą właściwości innych elementów. Każdy z nich rekurencyjnie może wpływać na inne zależne obiekty. Stan obiektu w takim modelu zależy od stanu innych obiektów oraz ich interakcji. Zwiększa to złożoność obliczeniową modelu symulacyjnego. Detekcja źródła awarii spowodowanej przez jej propagację z obiektu innej warstwy funkcjonalnej może być w rzeczywistości trudna do zrealizowania.

Symulacja to odwzorowanie i uproszczenie rzeczywistości. Prawdopodobnie odzwierciedlone zjawiska w symulacji wirtualnej dla infrastruktury publicznej osiągalne są dopiero przy dostatecznie wysokiej skali oraz szczegółowości modelu symulacyjnego. Zastosowanie pojedynczej maszyny może okazać się niewystarczające dla symulacji. Zastosowanie wielu rozproszonych symulatorów wymieniających się komunikatami poprzez interfejs HLA/DIS również może okazać się niewystarczające. Głównym celem tych interfejsów jest interoperacyjność różnego typu symulatorów. Podczas symulacji każdy z symulatorów odzwierciedla ten sam świat wirtualny. Synchronizacja działa na zasadzie subskrybowania oraz interpretacji komunikatów wysyłanych przez każdy węzeł w sieci. W efekcie nie pozwala to znacznie zwiększyć skali symulacji.

W praktyce, jeśli model symulacyjny jest zbyt złożony dla symulacji wirtualnej, najczęściej stosuje się symulację konstruktywną. W takim przypadku obiekty symulacyjne są agregowane w grupy, co demonstrowa rysunek nr 1. Symulacja dokonywana jest na większym obszarze kosztem szczegółowości.



**Rysunek nr 1. Utrata szczegółowości modelu przy zastosowaniu symulacji konstruktywnej**

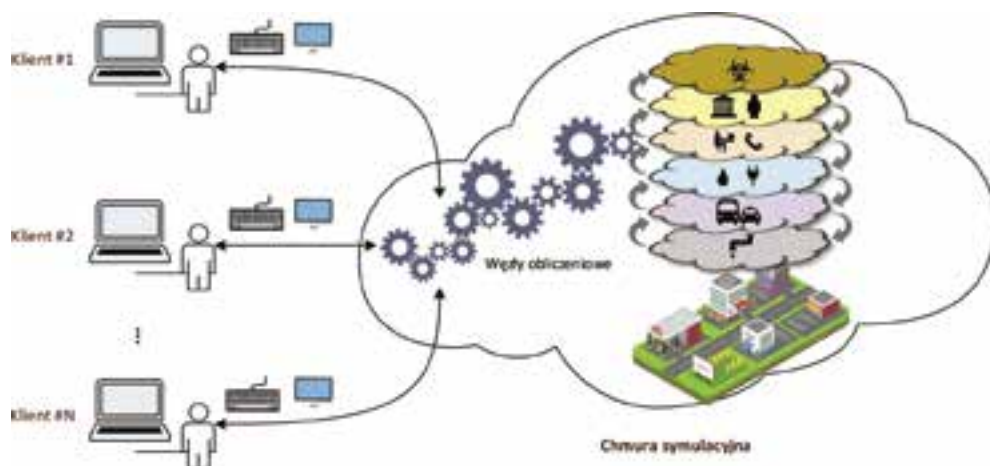
Źródło: opracowanie własne

Należy dążyć do sytuacji, w której każdy symulator odpowiedzialny jest za część symulacji. Efektem takiego działania jest symulacja, którą można skalować horyzontalnie, czyli dodając kolejne węzły symulacyjne. Przykładem takiej symulacji jest silnik SpatialOS firmy Improbable. Rozwiązanie to korzysta z chmur obliczeniowych Google Cloud<sup>9</sup>. Zastosowanie chmury symulacyjnej umożliwia skalowanie modelu symulacyjnego, zwiększenie złożoności symulacji, a co się z tym wiąże – jej realizmu.

Zastosowanie rozproszonej symulacji wirtualnej pozwoli:

- zwiększyć liczbę symulowanych obiektów oraz ich złożoność;
- zwiększyć złożoność logiki i precyzji modelowanych zjawisk;
- dokładniej kalibrować modele dla symulatorów konstruktywnych;
- uniknąć uogólniania modelu symulacyjnego w związku z koniecznością stosowania symulatorów konstruktywnych.

<sup>9</sup> <https://improbable.io/games/tech> (data odczytu: 7.11.2017).



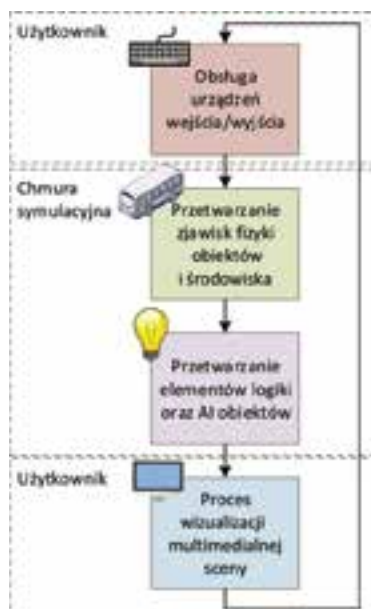
Rysunek nr 2. Koncepcja rozproszonej symulacji wirtualnej

Źródło: opracowanie własne

### 3. Koncepcja rozproszonego wielowarstwowego modelu symulacyjnego dla infrastruktury publicznej

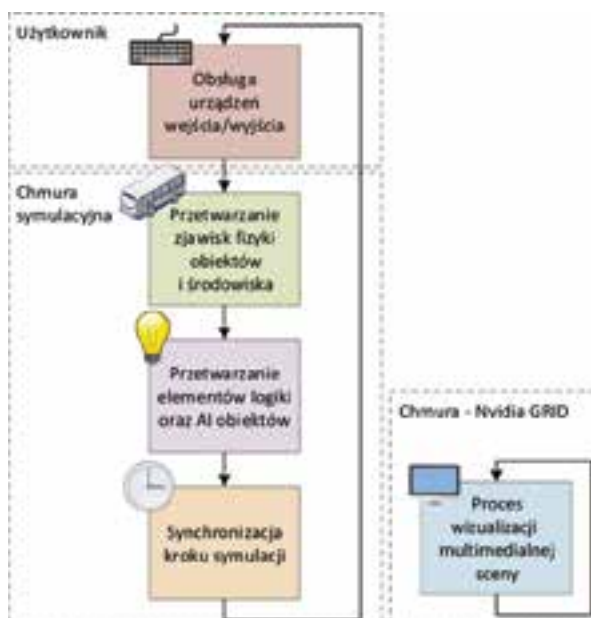
Możliwości rozproszenia obliczeń można doszukiwać się już od niskiego poziomu, jakim jest pętla symulacyjna/gry na pojedynczym symulatorze. W standardowej pętli wszystkie bloki funkcyjne wykonywane są sekwencyjnie, co ilustruje rysunek nr 3. Aby uzyskać płynność symulacji równą 50 klatek na sekundę czas obliczenia jednej klatki musi maksymalnie wynosić 20 milisekund. W przeciwnym przypadku symulacja zostanie tymczasowo wstrzymana w celu dokończenia obliczeń.

Jednym z elementów, które można wyodrębnić z pętli jest proces wizualizacji multimedialnej sceny, który może być obsługiwany przez chmurę wizualizacyjną Nvidia GRID. Pozwala ona na strumieniowanie trójwymiarowej sceny bezpośrednio do klienta symulacji. Umożliwia to stosowanie klientów o niewielkiej mocy przetwarzania w symulacji wirtualnej. Proces wizualizacji będzie na bieżąco przetwarzać trójwymiarowy model na podstawie danych ze wspólnego zasobu. Omawiany model pokazany jest na rysunku nr 4. W zależności od konfiguracji sprzętowej, jeden z węzłów obliczeniowych może dokonać obliczeń szybciej niż pozostałe. W związku z tym konieczna jest synchronizacja z zegarem pod koniec każdego wykonania pętli.



**Rysunek nr 3. Schemat działania sekwencyjnego silnika symulacji**

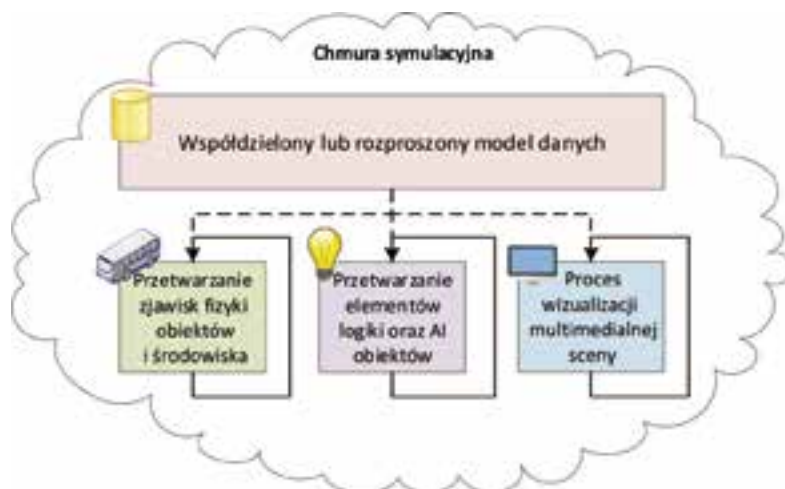
Źródło: opracowanie własne



**Rysunek nr 4. Schemat działania sekwencyjnego silnika symulacji z wydzielonym procesem wizualizacji**

Źródło: opracowanie własne

Idealnym rozwiązaniem byłby model asynchroniczny, w którym zadania nie czekają na wyniki innych zadań. Zamiast tego wykorzystywany byłby najnowszy obliczony wynik dostępny na wspólnym zasobie. Model ten wymaga rozwiązania problemu dostępu do danych. Możliwe jest zastosowanie współdzielonego lub rozproszonego modelu danych. Niestety, aby schemat ten działał prawidłowo, zadania muszą być starannie zaplanowane. Często model ten jest nierealizowalny w praktyce w związku z koniecznością sekwencyjnego wykonywania zadań.

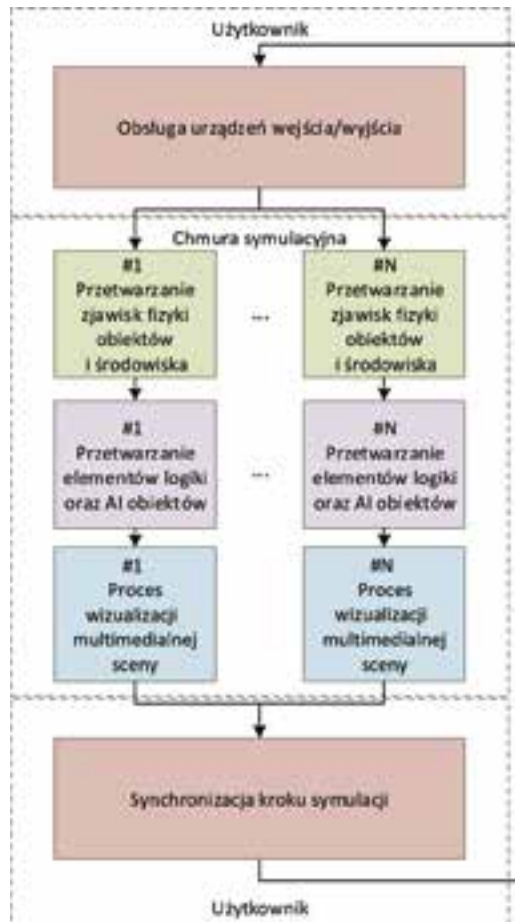


**Rysunek nr 5. Schemat działania asynchronicznego silnika symulacji**

Źródło: opracowanie własne

Kolejnym możliwym do zastosowania modelem pętli jest zgrupowanie danych w równoległych sekcjach aplikacji. Zamiast używania jednej głównej pętli, osobne wątki przetwarzają zestawy danych. Model ten jest skalowalny, ponieważ umożliwia alokację wielu wątków<sup>10</sup>. Elementem ograniczającym ten model są zadania, które muszą zostać wykonane sekwencyjnie, oraz konieczność wymiany komunikatów między obiektami znajdującymi się w różnych zestawach danych.

<sup>10</sup> V. Monkkonen, *Multithreaded game engine architectures*, 2006, [http://www.gamasutra.com/view/feature/130247/multithreaded\\_game\\_engine\\_.php?print=1](http://www.gamasutra.com/view/feature/130247/multithreaded_game_engine_.php?print=1) (data odczytu: 7.11.2017).

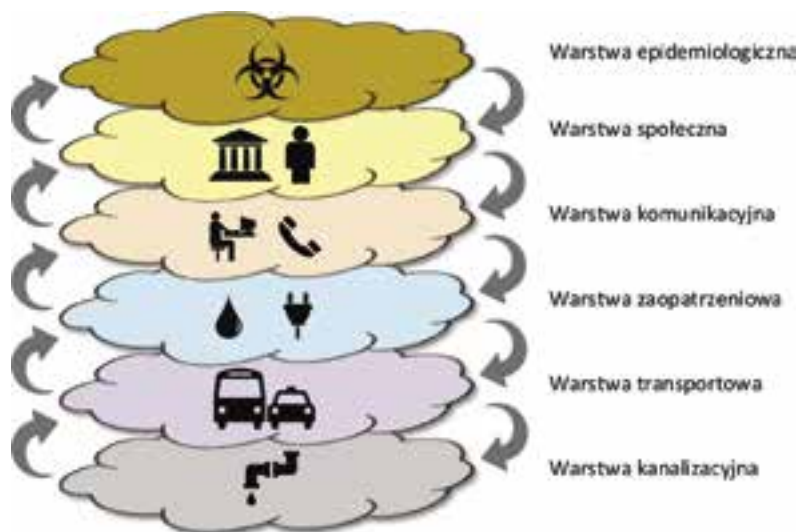


**Rysunek nr 6. Schemat działania silnika symulacji przetwarzającego zestawy danych**

Źródło: opracowanie własne

Silnik symulacji, wykorzystujący równolegle możliwie wiele zasobów, zwiększa wydajność pojedynczej maszyny. Model symulacyjny infrastruktury publicznej można podzielić na funkcjonalne warstwy. W takim modelu jeden lub wiele węzłów obliczeniowych przypisanych jest do konkretnej warstwy modelu symulacyjnego. Symulatory wymieniają się komunikatami poprzez RTI (*Runtime Infrastructure*). Wysyłane są tylko skutki zdarzeń. Nie ma potrzeby, aby każda warstwa odwzorowywała zjawiska, które jej nie dotyczą. Skutki zdarzeń są selektywnie subskrybowane i obsługiwane przez obiekty symulacyjne. Koncepcję tego modelu oddaje rysunek nr 7.





**Rysunek nr 7. Funkcjonalny podział chmur symulacyjnych dla wielowarstwowego modelu symulacji wirtualnej**

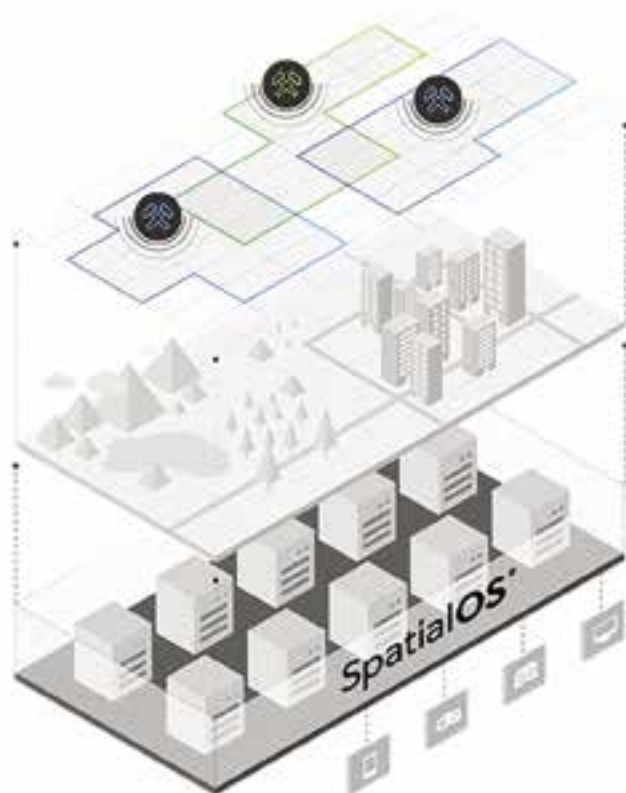
Źródło: opracowanie własne

Kolejnym podejściem przydziału węzłów obliczeniowych do zbiorów obiektów symulacyjnych jest model terytorialny. Efekty zdarzeń najczęściej wpływają na inne obiekty znajdujące się w pobliżu. W modelu tym wykorzystuje się statyczne lub dynamiczne przypisanie węzłów obliczeniowych do elementów symulacji, znajdujących się na określonym obszarze. Sposób ten balansuje zużycie zasobów. Wirtualne modele nie mają takiej samej złożoności obliczeniowej na swoim obszarze – trudniej odwzorować centrum miasta niż wieś lub małe miasteczko. Podobnie do zagadnienia podchodzi firma Improbable w swoim silniku SpatialOS, którego koncepcja znajduje się na rysunku nr 8.

Przypisanie węzłów do obszaru może być wykonane statycznie. Przeprowadzając symulację oraz analizę można dojść do zadowalającego rozkładu przydziału węzłów obliczeniowych. Przypisywanie dynamiczne polega na ciągłej analizie obciążenia węzłów obliczeniowych, powoływania nowych węzłów oraz zwalniania ich. Niestety proces analizy zużycia węzłów jest sam w sobie obciążeniem dla węzłów obliczeniowych. Wykorzystanie chmury symulacyjnej jako usługi umożliwia płynne powoływanie nowych instancji oraz kontrolowanie kosztów symulacji<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> W. Xiong, W.-T. Tsai, *HLA-Based SaaS-Oriented Simulation Frameworks*, „IEEE 8th International Symposium on Service Oriented System Engineering”, Oxford, 7.04.2014, s. 1–7.

Mechanizm ten pozwala na skalowanie zasobów zależnie od złożoności symulacji<sup>12</sup>. Koncepcję tego modelu oddaje rysunek nr 9.



**Rysunek nr 8. Koncepcja silnika SpatialOS**

Źródło: <https://improbable.io/games/tech>

<sup>12</sup> Q. Bragard, A. Ventresque, L. Murphy, *Self-Balancing Decentralized Distributed Platform for Urban Traffic Simulation*, „IEEE Transactions on intelligent transportation”, May 2017, vol. 18, no. 5, s. 1190–1196.



**Rysunek nr 9. Terytorialny model chmur symulacyjnych dla wielowarstwowego modelu symulacji wirtualnej**

Źródło: opracowanie własne

Omówione dwa podejścia – funkcjonalne oraz terytorialne – można połączyć w rozwiązanie hybrydowe. Dynamiczny przydział węzłów obliczeniowych zapewni elastyczność rozwiązania oraz możliwość korzystania z rozwiązań typu PaaS dla symulacji wirtualnej. Rozróżnienie wielu warstw modelu symulacyjnego daje możliwość implementacji dedykowanych węzłów obliczeniowych pod konkretną funkcjonalność. W przypadku obliczeń związanych ze sztuczną inteligencją można wykorzystywać dedykowane układy CPU/GPU, jak Nvidia Tesla lub *tensor processing unit* (TPU)<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> <https://www.extremetech.com/computing/247199-googles-dedicated-tensorflow-processor-tpu-makes-hash-intel-nvidia-inference-workloads> (data odczytu: 7.11.2017).



**Rysunek nr 10. Hybrydowy model chmur symulacyjnych dla wielowarstwowego modelu symulacji wirtualnej**

Źródło: opracowanie własne

#### 4. Podsumowanie i kierunki dalszych badań

W artykule omówiono perspektywę wykorzystania symulacji wirtualnej dla problemu analizy i zarządzania infrastrukturą publiczną. Zaproponowane rozwiązanie może wspierać badaczy w zakresie analiz, prognoz i weryfikacji. Pozwala badać skutki dokonywanych decyzji, zjawisk, czynności oraz zdarzeń w przeszłości i przyszłości. Docelowo może być elementem systemu wspomagania decyzji dla kadry zarządzającej infrastrukturą publiczną.

Przedstawione zostały problemy, z jakimi aktualnie mierzy się symulacja wirtualna w klasycznym wydaniu. Zaprezentowano rozwiązania wykorzystujące potencjał wykorzystania chmury obliczeniowej dla rozproszonej symulacji wirtualnej.

Wykorzystanie wielu węzłów wymagać będzie narzutu w postaci poświęcenia mocy obliczeniowej na zarządzanie oraz wymianę komunikatów między

nimi. Dalsze badania powinny obejmować metody oraz techniki zarządzania węzłami w chmurze symulacyjnej. Kierując się prawem Amdahla, należy ograniczyć wykonanie kodu sekwencyjnego dla najlepszego przyrostu wydajności w przypadku obliczeń rozproszonych.

## Bibliografia

- Bragard Q., Ventresque A., Murphy L., *Self-Balancing Decentralized Distributed Platform for Urban Traffic Simulation*, „IEEE Transactions on intelligent transportation”, May 2017, vol. 18, no. 5, s. 1190–1196.
- Joselli Z., Valente L., Feijó B., Clua E., Leta F.R., Zamith M., *A Distributed Architecture for Simulation Environments Based on Game Engine Systems* [w:] F.R. Leta (red.), *Visual Computing: Scientific Visualization and Imaging Systems*, Springer, Heidelberg – Nowy Jork – Dordrecht – Londyn 2014, s. 41–61.
- Nowa encyklopedia powszechna PWN*, t. 6, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- Pierzchała D., Kasprzyk R., Najgebauer A., *Modelowanie i symulacja rozprzestrzeniania się chorób zakaźnych w sieciach społecznych*, „Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne” 2011, nr 8–9, s. 1491–1496.
- Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (tekst jedn.: Dz.U. 2017, poz. 209).
- Xiong W., Tsai W.-T., *HLA-Based SaaS-Oriented Simulation Frameworks*, „IEEE 8th International Symposium on Service Oriented System Engineering”, Oxford, 7.04.2014, s. 1–7.

## Źródła sieciowe

- <https://www.extremetech.com/computing/247199-googles-dedicated-tensorflow-processor-tpu-makes-hash-intel-nvidia-inference-workloads> (data odczytu: 7.11.2017).
- [http://www.gamasutra.com/view/feature/130247/multithreaded\\_game\\_engine\\_.php?print=1](http://www.gamasutra.com/view/feature/130247/multithreaded_game_engine_.php?print=1) (data odczytu: 7.11.2017).
- <https://improbable.io/games/tech> (data odczytu: 7.11.2017).
- <http://rcb.gov.pl/infrastruktura-krytyczna> (data odczytu: 7.11.2017).

\* \* \*

## **Distributed Virtual Simulation as a Large-Scale Tool for Analysis and Management of Public Infrastructure**

### **Abstract**

The paper presents the concept of using distributed virtual simulation for a complex model of public infrastructure. It discusses the implications of using different approaches to distributed virtual simulation.

**Keywords:** simulation, distributed simulation, virtual simulation, cloud computing