

Symulacja komputerowa

Wykład 1: Podstawy symulacji komputerowej w inżynierii systemów

Dariusz Gąsior

Katedra Informatyki i Inżynierii Systemów

2 października 2025

Plan wykładu

- Podstawowe pojęcia z zakresu inżynierii systemów - przypomnienie
- Definicja symulacji

Czym jest inżynieria systemów?

- Dziedzina multidyscyplinarna: projektowanie, analiza i zarządzanie systemami złożonymi.
- Obejmuje cały cykl życia systemu (projekt, budowa, eksploatacja, wycofanie).
- Integruje aspekty techniczne, organizacyjne, ekonomiczne i społeczne.

Definicja (INCOSE)

Inżynieria systemów (INCOSE) - podejście transdyscyplinarne i integracyjne, które umożliwia skuteczne wytworzenie, użycie i wycofanie systemów inżynierskich przy użyciu zasad systemowych oraz metod naukowych, technicznych i zarządczych.

Podstawowe pojęcia

- **Obiekt** — wycinek rzeczywistości o określonych cechach i funkcjach.
- **Obiekt wejściowo-wyjściowy** — obiekt powiązany z otoczeniem poprzez wejścia i wyjścia.
- **Obiekt złożony** — złożony z wielu obiektów prostych.
- **System** — uporządkowany zbiór powiązanych ze sobą obiektów realizujących określony cel.

Obiekt

- Może być materialny (maszyna, czujnik) lub niematerialny (dane, algorytm).
- W modelowaniu często traktowany zgodnie z paradygmatem obiektowym.
- Najprostszy element analizy systemowej.

Obiekt wejściowo-wyjściowy

- Obiekt wymienia z otoczeniem sygnały: wejścia i wyjścia.
- Typowe oznaczenia: u — sterowania (zamierzone), z — zakłócenia (losowe), y — wyjście.
- Przykład: pompa wodna — u : polecenie włączenia/sterowanie przepływem; z : wahania poziomu wody, napięcia; y : rzeczywisty przepływ/ciśnienie.

Obiekt prosty vs obiekt złożony

- **Obiekt prosty** — istnieje samodzielnie, brak wewnętrznej struktury rozkładalnej.
- **Obiekt złożony** — zespół wzajemnie powiązanych obiektów prostych.

Obiekty złożone mogą wykazywać zachowania wynikające z interakcji podzespołów.

Przykład: samochód jako obiekt złożony (silnik, skrzynia biegów, hamulce).

System

System - zbiór powiązanych obiektów, które współdziałają, aby osiągnąć określony cel.

- System ma granice, cele i relacje z otoczeniem.
- Można go analizować hierarchicznie (podsystemy).

Taksonomie obiektów — przegląd

Klasyfikacje istotne w modelowaniu:

- statyczne vs dynamiczne
- ciągłe vs dyskretne
- deterministyczne vs niedeterministyczne (stochastyczne)
- liniowe vs nieliniowe
- stacjonarne vs niestacjonarne

Statyczne vs dynamiczne

- **Statyczne:** brak pamięci stanu — wyjście zależy wyłącznie od bieżącego wejścia.
Przykład: lokata bankowa (prosty związek wejście–wyjście).
- **Dynamiczne:** posiadają stan wewnętrzny (pamięć), wyjście zależy od historii wejść.
Przykład: termostat — decyzja zależy od obecnego i przeszłego stanu.

Ciągłe vs dyskretne

- **Ciągłe:** stan zmienia się płynnie w czasie (np. przepływ cieczy, układy analogowe).
- **Dyskretne:** zmiany stanu zachodzą w określonych momentach (próbkowanie) lub na zdarzenia (systemy zdarzeniowe).
Przykład dyskretny: sygnalizacja świetlna, systemy kolejkowe.

Deterministyczne vs niedeterministyczne

- **Deterministyczne:** ten sam zestaw wejść → zawsze ten sam wynik.
Przykład: obliczenia deterministyczne, lokata z oprocentowaniem stałym.
- **Niedeterministyczne (stochastyczne):** ten sam zbiór wejść może dawać różne wyniki — modelujemy rozkłady, procesy losowe.
Przykład: ruch drogowy, zachowanie użytkowników.

Liniowe vs nieliniowe

- **Liniowe:** proporcjonalność wejście–wyjście, superpozycja.
Przykład prosty: sprężyna (prawo Hooke'a) $F = -kx$.
- **Nieliniowe:** brak proporcjonalności, możliwe zjawiska złożone (bifurkacje, chaos).
Przykłady: elementy z histerezą, niektóre układy biologiczne i ekonomiczne.

Stacjonarne vs niestacjonarne

- **Stacjonarne:** parametry i statystyki nie zmieniają się w czasie (stałe warunki).
- **Niestacjonarne:** własności zmieniają się w czasie — wymagają modeli adaptacyjnych lub analiz w oknach czasowych.

Podstawowe zadania inżynierii systemów

- 1 **Modelowanie** — tworzenie reprezentacji systemu (abstrakcja).
- 2 **Analiza** — badanie zachowań modelu, weryfikacja hipotez.
- 3 **Podejmowanie decyzji** — wybór rozwiązań na podstawie wyników modelu (projektowanie i optymalizacja).

Symulacja komputerowa wspiera wszystkie trzy zadania.

Modelowanie – istota

- Tworzenie reprezentacji obiektów lub systemów.
- Ujęcie cech istotnych, pomijanie drugorzędnych.
- Cel: analiza, zrozumienie, komunikacja.
- Modele jako podstawowe narzędzie inżynierii systemów.

Model-Based Systems Engineering (MBSE)

- Definicja: modele jako główny nośnik informacji (Wymore, 2018).
- Zalety:
 - lepsza komunikacja między interesariuszami,
 - śledzenie wymagań (traceability),
 - integracja między dyscyplinami.
- Motywacja (Madni & Sievers, 2018):
 - klarowniejsze wymagania,
 - lepsze wyniki projektów.

Definicje

Modelowanie = proces tworzenia abstrakcyjnych reprezentacji obiektów/systemów **Model** - uproszczona reprezentacja obiektu, podkreślająca istotne cechy

- Cel: eksploracja zachowania, relacji, interakcji.
- Krótkie ujęcie: *model = uproszczona reprezentacja obiektu.*

Zastosowanie modeli

- Analiza systemów bez eksperymentów w rzeczywistości.
- Badanie zachowań przy różnych warunkach.
- Wspieranie podejmowania decyzji.
- Klasyfikacje modeli → wybór właściwego podejścia.

Zadanie analizy

- Cel: przewidzieć zachowanie systemu przy danych wejściach.
- Kroki:
 - 1 Zdefiniowanie wejść.
 - 2 Dobór modelu.
 - 3 Obliczenia / symulacje.
 - 4 Interpretacja wyników.
- Wartość: wgląd w interakcje zmiennych, wsparcie decyzji.

Przykład analizy

- Przemysł chemiczny: wpływ temperatury i ciśnienia na jakość produktu.
- Narzędzia: modele matematyczne i symulacje.
- Wynik: przewidywanie efektów → decyzje.

Zadanie decyzyjne

- Cel: znaleźć wejście, aby uzyskać określony wynik.
- Typy:
 - dokładne wyjście (deterministyczne),
 - optymalne (optymalizacja),
 - satysfakcjonujące (dopuszczalne zakresy).
- Modele wspierają podejmowanie decyzji (często jako algorytmy poszukiwania).

Przykład decyzji

- Proces chemiczny: dobór optymalnych parametrów temperatury i ciśnienia.
- Kryteria: jakość + koszt.
- Narzędzia: symulacje, metody optymalizacji.

Taksonomia modeli

Kategorie:

- 1 Ze względu na naturę – fizyczne, abstrakcyjne.
- 2 Ze względu na reprezentację niepewności – deterministyczne, stochastyczne, rozmyte, niepewne.
- 3 Ze względu na funkcję – opisowe, predykcyjne, preskryptywne.
- 4 Ze względu na dziedzinę – ekonomiczne, biologiczne, inżynierskie, inne.

Modele ze względu na naturę

- **Modele fizyczne** – makiety, prototypy.
- **Modele abstrakcyjne:**
 - konceptualne,
 - matematyczne,
 - symulacyjne.

Pochodzenie pojęcia symulacja

- Symulacja pochodzi od łacińskich słów *simulo* – "udawać, naśladować", *similis* – "podobny"
- Podstawowa idea: budowanie modeli imitujących rzeczywiste systemy

Definicje symulacji – różne perspektywy

- Eksperymentalny charakter: badanie zachowania systemu w czasie poprzez model (*Kleijnen 1974*)
- Narzędzie do zrozumienia systemu i oceny strategii operacyjnych (*Shannon 1975*)
- Imitacja rzeczywistych zdarzeń w czasie (*Schriber 1987*)
- Prosty eksperyment próbkowania przy użyciu modelu (*Seila 1995*)

Elastyczność i rekonfigurowalność

- Modele symulacyjne można rekonfigurować i eksperymentować na nich, czego często nie da się zrobić w rzeczywistym systemie (*Anu Maria 1997*)
- Tworzenie sztucznej historii systemu pozwala na wnioskowanie o zachowaniu rzeczywistego systemu (*Banks 1997*)
- Reprezentacja działania systemu przy użyciu innego systemu (*American Heritage 2000*)

Symulacja komputerowa

- Eksperymentowanie z uproszczoną imitacją systemu na komputerze w celu lepszego zrozumienia lub poprawy działania systemu (*Robinson 2020*)
- Technicznie: program komputerowy używający metod krok po kroku do badania przybliżonego zachowania modelu matematycznego (*Stanford 2023*)

Podsumowanie definicji

- Wspólne elementy definicji:
 - Eksperymentowanie na modelu
 - Badanie zachowania systemu w czasie
 - Często przy użyciu komputera
- Nasza definicja symulacji:
 - *„Symulacja to eksperyment komputerowy wykorzystujący model systemu, umożliwiający badanie i analizę jego zachowania w czasie.”*
- Perspektywa inżynierii systemów:
 - *„Symulacja to proces rozwiązywania zadania analitycznego przy użyciu modelu symulacyjnego.”*

Kiedy stosować symulację?

- Gdy system jest zbyt skomplikowany, by analizować go analitycznie
- Gdy eksperymentowanie na rzeczywistym systemie jest niemożliwe lub kosztowne
- Gdy chcemy przewidzieć zachowanie systemu w różnych scenariuszach
- Gdy system jest niebezpieczny lub ryzykowny dla testów w rzeczywistości
- Gdy potrzebna jest optymalizacja lub ocena różnych strategii działania
- Gdy chcemy badać system w czasie rzeczywistym lub przy zmiennych warunkach

Kiedy nie stosować symulacji?

- Gdy system jest prosty i można go analizować analitycznie
- Gdy koszt stworzenia modelu przewyższa korzyści z symulacji
- Gdy dostępne dane są niewystarczające lub bardzo niepewne
- Gdy wymagana jest dokładna odpowiedź, a symulacja daje tylko przybliżenia
- Gdy czas wykonania symulacji jest zbyt długi w porównaniu do potrzeb decyzyjnych
- Gdy eksperymenty na rzeczywistym systemie są tanie i bezpieczne

Zalety i wady symulacji

- **Zalety:**

- Możliwość eksperymentowania bez ryzyka
- Pozwala badać systemy złożone i dynamiczne
- Umożliwia testowanie różnych scenariuszy i strategii
- Może być tańsza niż eksperymenty w rzeczywistym systemie
- Wspiera podejmowanie decyzji i optymalizację

- **Wady:**

- Wymaga stworzenia dokładnego modelu
- Może być kosztowna pod względem czasu i zasobów obliczeniowych
- Wyniki są przybliżone – zależą od jakości modelu i danych
- Trudności w interpretacji wyników w przypadku bardzo złożonych systemów

Etapy badań symulacyjnych

- ❶ Wstępne kroki: identyfikacja systemu, celu i zakresu badań
- ❷ Specyfikacja modelu: konceptualizacja i formalizacja
- ❸ Programowanie modelu: wybór narzędzia i implementacja
- ❹ Eksperyment wstępny: weryfikacja i walidacja
- ❺ Planowanie eksperymentu
- ❻ Wykonanie badań: uruchamianie modelu symulacyjnego
- ❼ Analiza, prezentacja i interpretacja wyników
- ❽ Dokumentacja i praktyczne zastosowanie wyników

Pytania

Czy są pytania?