Metoda dynamiki systemowej w modelowaniu złożonych systemów i procesów

R. HOFFMANN, T. PROTASOWICKI
romuald.hoffmann@wat.edu.pl

Instytut Systemów Informatycznych
Wydział Cybernetyki WAT
ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Autorzy przedstawili metodę dynamiki systemowej (ang. *System Dynamics*), która umożliwia budowę modeli symulacji ciągłej. Artykuł ma postać rozważań teoretycznych dotyczących samej metody, jak również jej potencjalnych zastosowań w symulacji złożonych systemów i zachodzących w nich procesów. Opisana w artykule metoda pozwala modelować strukturę i dynamikę złożonych systemów, uwzględniając przy tym występujące w tych systemach liczne sprzężenia zwrotne. Dzięki rozpatrywaniu badanego systemu, jako spójnej całości w kontekście jego dynamiki, tworzone modele symulacyjne umożliwiają łatwe odwzorowanie i zrozumienie nawet bardzo skomplikowanych relacji o nieliniowym charakterze. Omawiana metoda pozwala na łatwe dokonywanie adaptacji zbudowanego modelu do bieżących potrzeb, m.in. w celu sprawdzenia kolejnych hipotez lub nowych scenariuszy działania. Dzięki tym właściwościom może ona być z powodzeniem stosowana w modelowaniu i analizie różnych klas złożonych zagadnień z zakresu niemalże dowolnej dziedziny problemowej.

Słowa kluczowe: symulacja, dynamika systemowa, modelowanie złożonych systemów.

1. Wprowadzenie

W niniejszej pracy autorzy przedstawili metodę dynamiki systemowej (ang. *System Dynamics*), która umożliwia budowę modeli symulacji ciągłej. Pozwala ona modelować strukturę i dynamikę złożonych systemów i zachodzących w nich procesów. Uwzględnia przy tym występujące w tych systemach liczne sprzężenia zwrotne, które opisują zależności przyczynowo-skutkowe pomiędzy elementami badanego systemu. Fundamentalnym założeniem metody jest rozpatrywanie badanego systemu jako spójnej całości w kontekście jego dynamiki. W procesie modelowania wykorzystuje się struktury umożliwiające czytelne i łatwe do zrozumienia odwzorowanie w budowanych modelach nawet bardzo skomplikowanych relacji o nieliniowym charakterze. Kolejną ważną cechą omawianej metody jest możliwość szybkiego dokonywania adaptacji modelu do bieżących potrzeb, m.in. w celu sprawdzenia kolejnych hipotez lub nowych scenariuszy działania. Wymienione powyżej właściwości metody dynamiki systemowej sprawiają, że może ona być z powodzeniem stosowana w modelowaniu i analizie różnych klas złożonych zagadnień z zakresu niemalże dowolnej dziedziny problemowej.

W ramach niniejszej publikacji autorzy dokonali przeglądu metody dynamiki systemowej, którego celem było spójne przedstawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego tego podejścia do budowy modeli symulacyjnych. Dlatego też w kolejnych punktach artykułu autorzy przedstawili struktury używane podczas modelowania, omówili proces modelowania i jego poszczególne etapy, opisali podstawy matematyczne budowy równań opisujących modelowany system i metody numeryczne wykorzystywane w rozwiązywaniu tych równań. W artykule opisano również charakterystyki zachowań systemów dynamicznych i przedstawiono przykładowe obszary zastosowań, w których jest możliwe użycie metody dynamiki systemowej.

2. Modelowanie złożonych układów w ujęciu dynamiki systemowej

Łukaszewicz [8] dokonał wyróżnienia trzech podstawowych elementów występujących w modelowanych obiektach:

- poziom (ang. *level*) – wielkość chwilowa, która określa stan wyróżnionego elementu systemu
- przepływ (ang. *flow*) – strumień określający szybkość, z jaką zmieniają się wartości poziomów

- zmienne decyzyjne – odpowiadają za regulację wielkości przepływów w zależności od informacji o chwilowych stanach systemu.

Metoda dynamiki systemowej wykorzystuje struktury pozwalające na czytelne i łatwe do zrozumienia odwzorowanie skomplikowanych relacji o nieliniowym charakterze, są to:

- pętle przyczynowo-skutkowe oparte na występujących w systemie sprzężeniach zwrotnych
- poziomy i przepływy obrazujące stan systemu w wybranej chwili.

Sprzężenia zwrotne stanowią podstawę dynamicznej natury złożonych systemów. Wykazywana przez nie dynamika wiąże się z występowaniem i interakcją dwóch rodzajów sprzężeń zwrotnych:

- dodatnich (ang. *positive feedback*), cechujących się tendencją do samowzmacniania (ang. *self-reinforcing*), objawiającego się obserwatorowi układu gwałtownym wzrostem wartości liczbowych określonych zmiennych
- ujemnych (ang. *negative feedback*), stanowiących przeciwwagę dla sprzężeń dodatnich, co wiąże się z ich działaniem równoważącym (ang. *self-correcting*) działania dodatnie występujące między zmiennymi, które objawia się obserwatorowi układu jako raptowny spadek wartości określonych zmiennych.

Poszukiwanie tych zależności w badanych systemach jest istotą modelowania metodą dynamiki systemowej. Wywodzi się ono z analizy systemów technicznych i przemysłowych, jednak sprawdza się doskonale w badaniu zjawisk zachodzących w systemach społecznych, ekonomicznych i innych. Taka uniwersalność zastosowań stanowi o wielkiej sile metody dynamiki systemowej [10].

Pętle przyczynowo-skutkowe występujące samodzielnie pozbawione są możliwości odwzorowania struktury poziomów i przepływów występujących w badanym systemie. Poziomy i przepływy stanowią oś, wokół której skupia się cała koncepcja dynamiki systemowej. Całkowanie, będące podstawą idei zastosowania w modelowaniu poziomów i przepływów, powoduje czasowy charakter zachowań w systemie, a także jest źródłem powstawania opóźnień między wpływającymi na nie strumieniami. Stanowi przez to o dynamicznym zachowaniu się systemu.

3. Proces modelowania i jego etapy

Sterman w pracy [10] wysuwa tezę, że nie istnieje recepta gwarantująca skuteczne przeprowadzenie procesu modelowania dynamicznego i zapewniająca użyteczność opracowanego modelu. Wynika to z faktu, że proces modelowania jest z natury procesem twórczym oraz z tego, że twórców modeli zazwyczaj cechują różne cele i podejście do wykonywanej pracy. Jednakże można dokonać wyróżnienia pięciu zasadniczych etapów, które powinny być wykonane w procesie modelowania dynamicznego:

1. Określenie badanego problemu.
2. Sformułowanie hipotez dotyczących istoty badanego problemu.
3. Opracowanie modelu symulacyjnego.
4. Testowanie opracowanego modelu.
5. Projektowanie reguł decyzyjnych i ich testowanie.

Poprawne określenie badanego problemu stanowi fundament całego procesu modelowania, dlatego przed przystąpieniem do dalszych etapów budowy modelu niezbędne jest udzielenie odpowiedzi na kilka pytań:

- jaka jest najważniejsza kwestia problemu, na której należy się skupić?
- jaki jest prawdziwy problem, a nie jego objawy?
- jakie jest przeznaczenie modelu?

Jasne określenie przeznaczenia i celu budowy modelu umożliwia ustalenie kryteriów pozwalających na wyeliminowanie z niego zbędnych składników. Model jest użyteczny w momencie, gdy stanowi wyjaśnienie pewnego specyficznego problemu. Na jego poprawne określenie duży wpływ ma również wybranie odpowiednio długiego horyzontu czasowego. W złożonych systemach przyczyna i skutek są zazwyczaj odległe od siebie w czasie. Dlatego podczas budowy modelu należy zawsze korzystać z danych historycznych, o ile są one dostępne. Ponadto dobór odpowiednio szerokich ram czasowych modelu może znacząco wpłynąć na zmiany w procesie projektowania i oceny reguł decyzyjnych.

Hipotezy dynamiczne stanowią teorię mającą na celu wyjaśnienie skomplikowanego zachowania systemu. Formułuje się je, poszukując zmiennych endogenicznych, które wyjaśniają analizowane zjawisko poprzez zachodzące między nimi interakcje. Interakcje te generują dynamikę systemu. Wyspecyfikowanie elementów struktury wraz z regułami interakcji pomiędzy nimi (regułami decyzyjnymi), pozwala zbadać wzory zachowania się systemu.

Umożliwia to badanie wpływu potencjalnych zmian tej struktury lub reguł decyzyjnych na zachowanie się modelowanego systemu. Oprócz zmiennych endogenicznych, w modelu można uwzględnić również zmienne egzogeniczne, jednak ich liczba powinna być możliwie mała. Ponadto każda zmienna kandydująca na zmienną egzogeniczną modelu powinna być dokładnie przeanalizowana, aby stwierdzić, czy nie reprezentuje ona jakiegoś ważnego sprzężenia z elementami endogenicznymi. Jeżeli tak jest, to należy rozszerzyć granice modelu i uwzględnić tę zmienną jako endogeniczną.

Po wstępnym określeniu problemu oraz sformułowaniu hipotez dynamicznych następuje opracowanie modelu symulacyjnego. W tym celu należy dokonać uszczegółowienia zbudowanego zbioru diagramów poprzez jego uzupełnienie równaniami, parametrami oraz ustalenie stanów początkowych zmiennych. Taka formalizacja pozwala na przeprowadzenie pierwszych prób symulacji oraz oceny jakości zbudowanego modelu. Pozwala to na wykrycie nieprawidłowości zaistniałych w poprzednich etapach i podjęcie działań zmierzających do poprawienia modelu.

Faza testowania zbudowanego modelu pozwala ocenić uzyskiwane przy jego użyciu przebiegi poprzez ich porównanie z danymi historycznymi (o ile są one dostępne). Ponadto niezbędne jest wykonanie przeglądu modelu pod kątem poprawności równań oraz istotności zmiennych, które muszą odzwierciedlać znaczące pojęcia występujące w świecie rzeczywistym. Testy modelu pozwalają zbadać, czy model nie daje niemożliwych do wystąpienia przebiegów przy narzuceniu wartości parametrów sterujących w zakresie przekraczającym wartości występujące w świecie rzeczywistym.

Proces projektowania i oceny reguł decyzyjnych ma na celu zbadanie wpływu zmian na zachowanie się tworzonego modelu. Zmiany te powinny nieść przede wszystkim poprawę i służyć za podstawę do wprowadzania modyfikacji w systemie rzeczywistym. Projektowanie reguł decyzyjnych nie powinno sprowadzać się wyłącznie do zmian wartości wybranych parametrów modelu. Wskazane jest, aby działania te obejmowały swoim zakresem budowanie całkowicie nowych strategii, przeprojektowywanie struktur modelu, eliminację opóźnień, zmianę przepływów, niesionej informacji itd. Następnie niezbędne jest podjęcie działań, które będą prowadziły do zbadania jakości nowych reguł decyzyjnych oraz oceny ich stopnia niepewności.

4. Podstawy matematyczne metody dynamiki systemowej

W modelach matematycznych zbudowanych z wykorzystaniem metody dynamiki systemowej wyróżniamy równania:

- poziomów – opisane równaniami różniczkowymi pierwszego rzędu
- przepływów – dane równaniami algebraicznymi
- zmiennych pomocniczych – określone jako równania algebraiczne.

Z powyższych równań otrzymujemy układ równań różniczkowo-algebraicznych, stanowiący opis matematyczny związków przyczynowo-skutkowych występujących w modelowanym systemie.

W metodzie dynamiki systemowej stosowane są równania różniczkowe zwyczajne pierwszego rzędu wyprowadzone z ogólnej postaci zagadnienia Cauchy'ego [6]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}X(t) = F(X,\lambda,t), \\ X(t_0) = X_0 \end{cases} \tag{1}$$

gdzie:
X – wektor zmiennych stanu,
λ – wektor parametrów modelu,
t – zmienna niezależna,
X_0 – wektor wartości początkowych dla wektora X.

Układ (1) sprowadza się w konwencji, opisu elementów i związków występujących między nimi, właściwej dla dynamiki systemowej do następującej postaci:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}L = F(L,X,\lambda,t), \\ X = G(L,X,\lambda,t), \\ L(t_0) = L_0 \end{cases} \tag{2}$$

gdzie:
L – wektor poziomów (zmiennych stanu),
X – wektor wartości strumieni i zmiennych pomocniczych,
λ – wektor parametrów modelu,
t – zmienna niezależna,
L_0 – wektor wartości początkowych dla wektora L.

W modelowaniu złożonych systemów często zachodzi potrzeba odwzorowania wariantowości decyzji, mających wpływ na wybór reguł obliczania wartości zmiennych w modelu. Wariantowość tę opisuje się następująco:

$$D(t) = d_1(t) \vee \cdots \vee d_n(t) \vee \cdots d_N(t) \quad (3)$$

gdzie:
$D(t)$ – strumień określony alternatywną regułą decyzyjną,
$d_n(t)$ – wariant alternatywnej decyzji,
N – liczba uwzględnianych wariantów d_n.
Bardzo często postać reguły decyzyjnej wymaga wykonania wielu przekształceń z użyciem funkcji specjalnych. Przykładem takiej funkcji jest funkcja wybierająca wartości maksymalne lub minimalne z zadanego zbioru danych, funkcja generująca impuls Diraca itp.

Wprowadzenie do modelu równań warunków logicznych powoduje skokowe zmiany w charakterystykach czasowych niektórych zmiennych. Jest to przyczyną powstawania nieciągłości w przebiegu innych sprzężonych z nimi zmiennych.

Zmienne egzogeniczne reprezentujące czynniki spoza systemu modeluje się jako [6]:

- wartości stałe
- funkcje empiryczne
- zmienne zdeterminowane
- zmienne losowe o zadanym rozkładzie.

5. Podstawy obliczeniowe metody dynamiki systemowej

Układy równań różniczkowych wykorzystywane w metodzie dynamiki systemowej rozwiązuje się, wykorzystując schematy różnicowe jedno- lub wielokrokowe [12]. Wybór konkretnej metody zależy od oczekiwanej dokładności, zdeterminowanej przeznaczeniem opracowywanego modelu.

Metody jednokrokowe oparte są na założeniu, że dla równania stanu systemu w postaci:

$$\frac{d}{dt}x(t) = f\big(x(t), u(t)\big) \quad (4)$$

funkcja $f(\dots)$ nie jest funkcją szybkozmienną, a krok czasowy h nie jest zbyt duży. Metody te opierają się głównie na rozwinięciu w szereg Taylora. Ich główną zaletą jest fakt, że do wyznaczenia rozwiązania w kolejnym kroku x_{n+1} konieczna jest znajomość wyłącznie wartości z kroku poprzedniego x_n.

Algorytm ekstrapolacyjny Eulera dany jest równaniem:

$$x_{n+1} = x_n + hf(x_n, t_n) + \frac{h^2}{2!} + \\ + f^{(1)}(x_n, t_n) + \cdots + \frac{h^p}{p!} + \quad (5) \\ + f^{(p-1)}(x_n, t_n)$$

gdzie:
p – rząd pochodnej,
h – krok,
stąd przy $p = 1$ otrzymujemy:

$$x_{n+1} = x_n + hf(x_n, t_n) \quad (6)$$

W wyniku jego działania obliczane są kolejne rozwiązania równania w odstępach czasu równych h. Schemat Eulera stanowi najprostszą i najmniej skomplikowaną obliczeniowo metodę jednokrokową, jednak charakteryzuje się sporymi błędami, zwłaszcza przy dużych wartościach kroku h. Lokalny błąd obcięcia metody Eulera jest rzędu $O(h^2)$, natomiast globalny błąd obcięcia jest rzędu $O(h)$. Metoda ta nadaje się do obliczeń w modelach, w których dane wejściowe obarczone są błędami lub zakres modelu jest bardzo duży i obejmuje wiele zmiennych. W takich zastosowaniach wydaje się on wystarczająco dokładny.

W modelach wymagających większej precyzji obliczeń niezbędne jest zastosowanie algorytmów bardziej dokładnych np. Rungego-Kutty (RK). Najczęściej stosowanymi z tej rodziny są algorytmy drugiego i czwartego rzędu.

Działanie algorytmu RK drugiego rzędu przebiega następująco: najpierw wyznaczane jest próbne rozwiązanie k_1 na podstawie pochodnej w punkcie startowym, a następnie na podstawie tego rozwiązania wyznaczany jest kolejny punkt k_2. W zależności od wartości współczynnika a, punkt ten znajduje się pomiędzy rozwiązaniem końcowym a początkowym. Rozwiązanie końcowe jest wyznaczane na podstawie zależności (7) jako suma rozwiązań w punktach pośrednich k_1 i k_2.

$$x_{n+1} = x_n + (1-a)k_1 + ak_2 \quad (7)$$

$$k_1 = hf(x_n, t_n) \quad (8)$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \tfrac{1}{2a}k_1, t_n + \tfrac{1}{2a}h\right) \quad (9)$$

Algorytmy RK drugiego rzędu charakteryzują się lokalnym błędem obcięcia rzędu $O(h^3)$ i globalnym błędem obcięcia rzędu $O(h^2)$. W zastosowaniach praktycznych w celu osiągnięcia odpowiedniej dokładności wymagane jest stosowanie małych kroków h.

Ze względu na dopuszczalny większy krok i dokładność, częściej używany jest algorytm RK czwartego rzędu:

$$x_{n+1} = x_n + \tfrac{1}{6}k_1 + \tfrac{1}{3}k_2 + \tfrac{1}{3}k_3 + \tfrac{1}{6}k_4 \quad (10)$$

$$k_1 = hf(x_n, t_n) \quad (11)$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \tfrac{1}{2}k_1, t_n + \tfrac{1}{2}h\right) \qquad (12)$$

$$k_3 = hf\left(x_n + \tfrac{1}{2}k_2, t_n + \tfrac{1}{2}h\right) \qquad (13)$$

$$k_4 = hf(x_n + k_3, t_n + h) \qquad (14)$$

Algorytm ten przy względnie dużym kroku pozwala uzyskać względnie mały lokalny błąd obcięcia.

6. Charakterystyka zachowań systemów dynamicznych

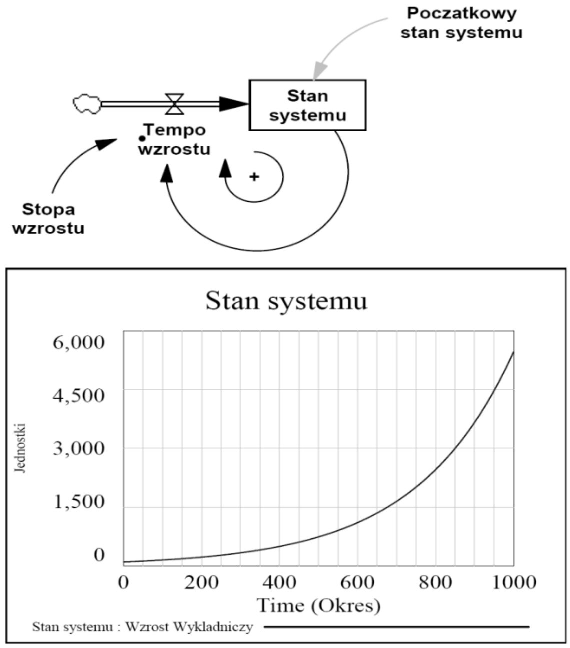
W literaturze [1–6, 8, 10] dotyczącej metody dynamiki systemowej wyróżnia się trzy zasadnicze wzory zachowania systemów:

- wzrost (lub spadek) wykładniczy
- poszukiwanie celu
- oscylacje.

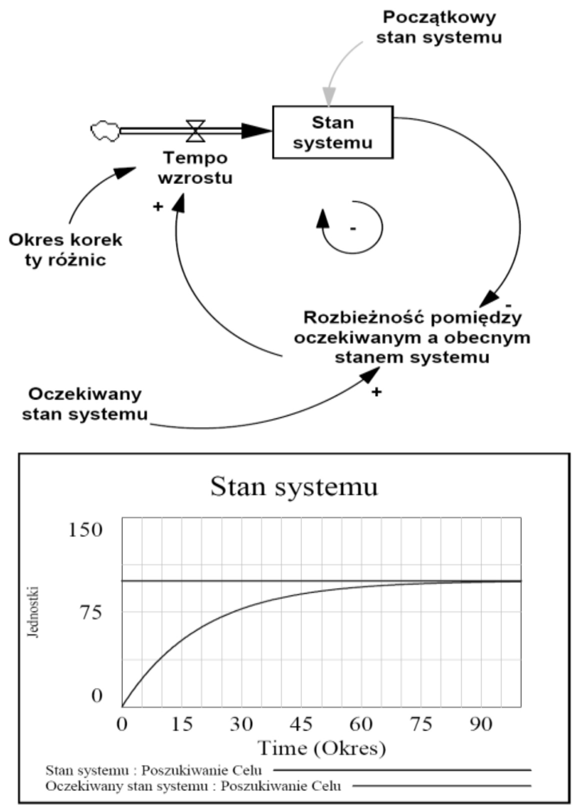
Są one generowane przez dominujące proste struktury sprzężeń zwrotnych, odpowiednio: pętle dodatnie, pętle ujemne, pętle ujemne z opóźnieniami. Natomiast nieliniowe interakcje pomiędzy wymienionymi typami podstawowymi tworzą bardziej złożone wzorce zachowań, takie jak m.in.: wzrost typu „S”, wzrost typu „S” z przesterowaniem oraz przesterowanie i zanik.

Wzrost (lub spadek) wykładniczy (ang. *exponential growth*, *exponential decay*) charakteryzuje się określonym czasem, w którym wartość zmiennej charakteryzującej stan systemu ulega podwojeniu (lub spada o połowę). Źródłem takiego przebiegu jest występowanie w systemie przeważającej dodatniej pętli sprzężenia zwrotnego. Na rysunku 1 przedstawiono przykład takiego zachowania oraz strukturę generującego je systemu zamodelowanego przy użyciu narzędzia Vensim.

Zachowanie typu poszukiwanie celu (ang. *goal seeking*) powstaje wskutek działania w modelowanym systemie dominującej ujemnej pętli sprzężenia zwrotnego. Ujemne pętle sprzężenia zwrotnego sprowadzają system do stanu równowagi, w przeciwieństwie do pętli dodatnich, które wzmacniają odchylenia od tego stanu. Poszukiwanie celu polega na porównywaniu aktualnego stanu systemu ze stanem pożądanym i podejmowaniu na tej podstawie odpowiednich akcji korekty przybliżającej stan systemu do stanu pożądanego, dopóki nie zostanie on osiągnięty. Rysunek 2 przedstawia przykład realizacji omawianego zachowania oraz strukturę generującego je systemu.

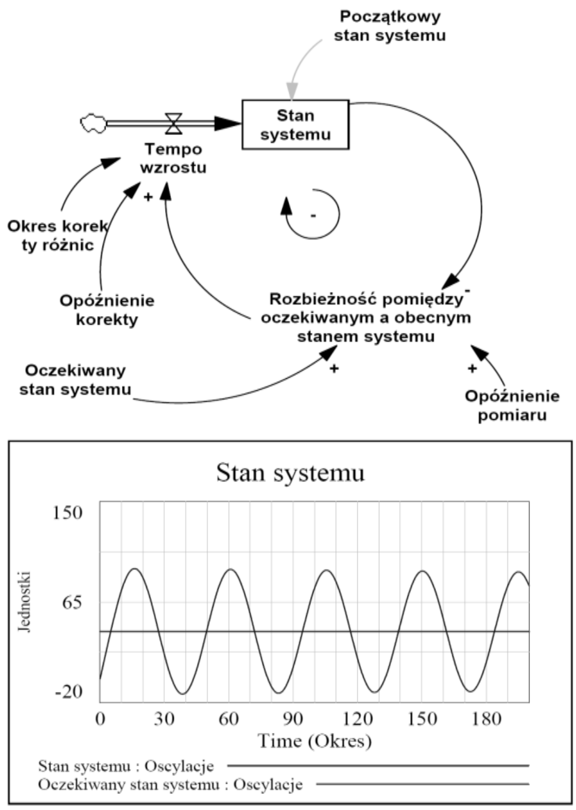


Rys. 1. Model systemu generującego wzrost wykładniczy i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji;
Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Model systemu generującego zachowanie dążenia do celu i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji;
Źródło: opracowanie własne

Oscylacje (ang. *oscillation*) występujące w złożonych systemach i procesach wiążą się ściśle z występowaniem w systemie zjawiska opóźnień. Opóźnienia działają na podejmowane akcje korekty stanu systemu, których celem jest przybliżenie go do stanu równowagi. W wyniku tego oddziaływania dochodzi do ciągłego przesterowania stanu systemu względem stanu oczekiwanego zarówno „in minus", jak również „in plus". Przykład realizacji zachowania poszukiwania celu z oscylacjami przedstawia rysunek 3.

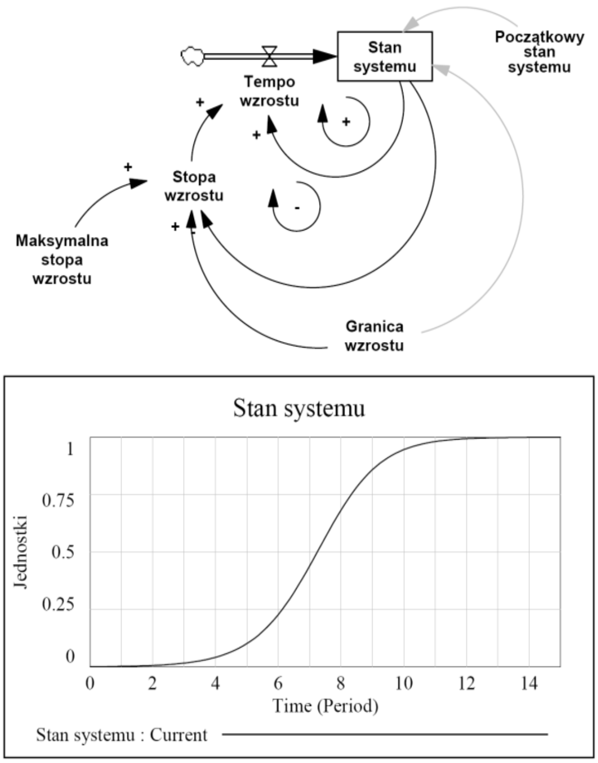


Rys. 3. Model systemu generującego oscylacje i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji; Źródło: opracowanie własne

Wzrost typu „S" (ang. *S-shaped growth*) jest jednym z najczęściej obserwowanych w złożonych systemach. Stanowi on wynik nieliniowej interakcji pomiędzy dominującą w rozpatrywanym systemie dodatnią i ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego przy założeniu, że:

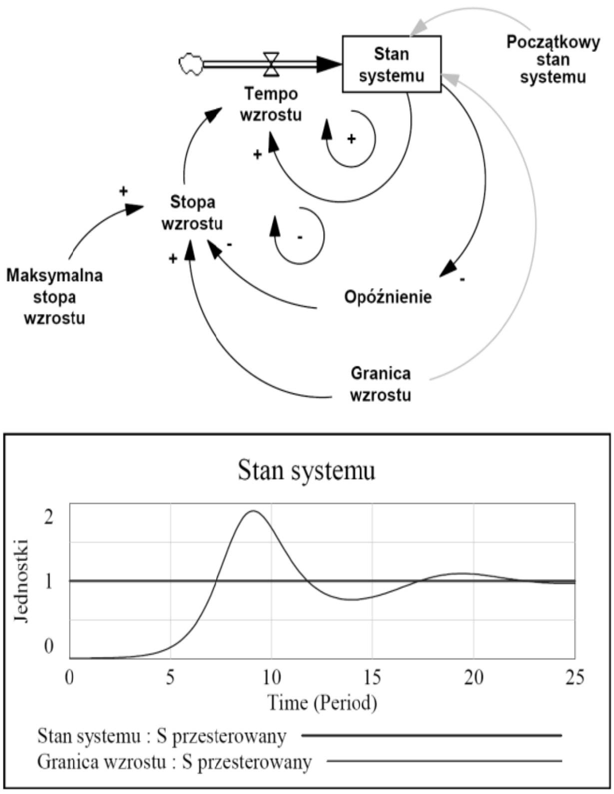
- istnieje pewna stała granica wzrostu, do której dąży system
- stan systemu w chwili t – 0 jest odległy od granicy wzrostu określonej dla tego systemu
- ujemna pętla sprzężenia zwrotnego nie zawiera elementów generujących opóźnienia.

W przebiegu procesu generującego wzrost typu „S" można rozróżnić dwie fazy, tj. początkowy wzrost wykładniczy wartości zmiennej (zmiennych) stanu oraz następujące później zmniejszenie tempa wzrostu i dążenie do granicy wzrostu (rysunek 4).

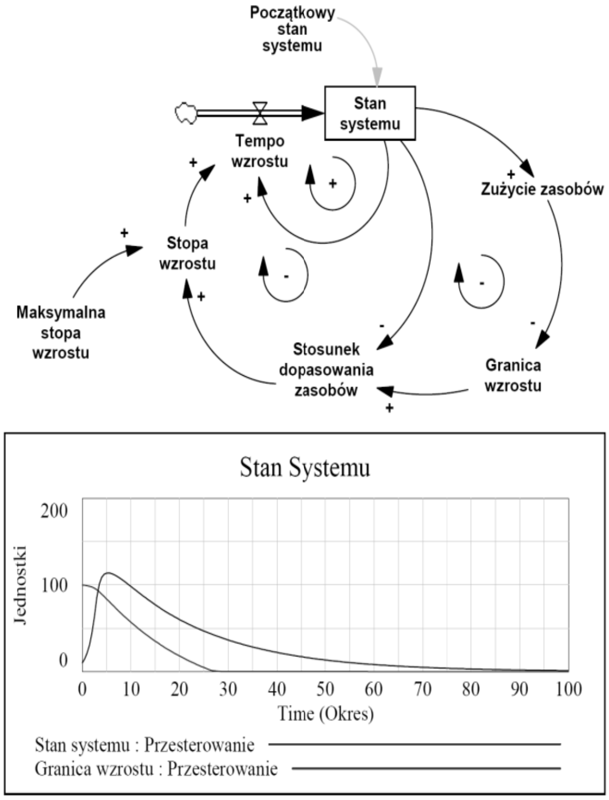


Rys. 4. Model systemu generującego wzrost typu „S" i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji; Źródło: opracowanie własne

W systemach lub procesach generujących zachowanie określane jako wzrost typu „S" często spotyka się opóźnienia przepływów. Występowanie tych opóźnień powoduje niestabilność związaną z przekroczeniem przez zmienną (lub zmienne) stanu wartości granicy wzrostu systemu. Powoduje to powstanie oscylacji wokół przyjętej wartości granicznej, która objawia się poprzez ciągłe przesterowanie stanu systemu względem stanu oczekiwanego. Wartość przesterowania zmniejsza się z upływem czasu, dążąc do osiągnięcia przez układ wartości granicznej wzrostu (rysunek 5).



Rys. 5. Model systemu generującego wzrost typu „S” z przesterowaniem i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji; Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Model systemu generującego wzrost typu „S” z przesterowaniem i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji; Źródło: opracowanie własne

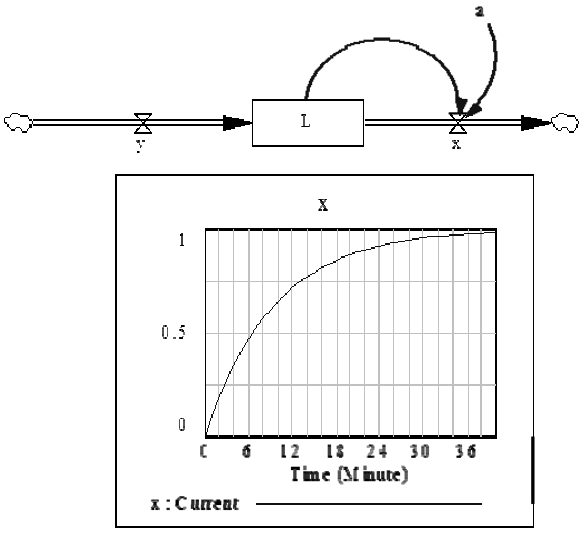
Zjawisko przesterowania i zaniku (ang. *overshoot and collapse*) występuje wtedy, gdy nie jest spełniony warunek niezmienności granicy wzrostu dla badanego systemu. Zmiana poziomu określającego maksymalny stan systemu związana jest głównie ze zużywaniem zasobów w trakcie realizacji pewnych procesów. Jeżeli zasoby stanowią dobra nieodnawialne, to efektem będzie ich całkowite wyczerpanie, co spowoduje również zatrzymanie procesu, który ich wymaga. Jeżeli mamy do czynienia z zasobami odnawialnymi, to proces ich wymagający zostanie spowolniony, aż do osiągnięcia poziomu równowagi. Model systemu generującego omawiane zachowanie przedstawia rysunek 6.

7. Modelowanie opóźnień

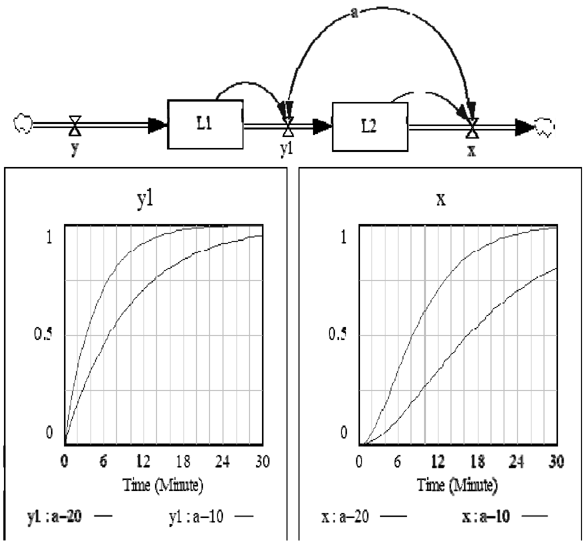
Zmiany stanów elementów systemu, pozostających w związkach przyczynowo-skutkowych, mogą zachodzić równocześnie (ewentualnie w pomijalnie małych odstępach czasu) lub mogą być przesunięte wobec siebie w czasie. Mając do czynienia z niepomijalnym odstępem czasu pomiędzy zmianami wartości stanu elementu wywołującego bodziec a zmianami stanu elementu zależnego od tego bodźca, mówimy o występowaniu opóźnień (ang. *delays*). Stanowią one przyczynę występowania w złożonych systemach zjawisk prowadzących do niestabilności (np. oscylacji lub przesterowania). Koncepcję zjawiska opóźnień przedstawia ideowo rysunek 7. W dalszych rozważaniach można przyjąć wstępne uogólnienie w postaci rozpatrywania opóźnienia jako procesu, którego stan wejściowy pojawia się na wyjściu po upływie określonego czasu.

Rys. 7. Model systemu generującego wzrost typu „S” z przesterowaniem i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji; Źródło: opracowanie własne

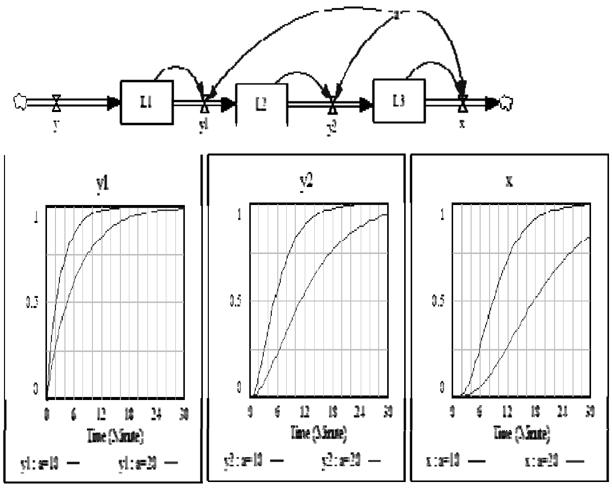
Oprócz opóźnień skupionych w czasie, występują również opóźnienia w nim rozłożone. W takim przypadku wartość wielkości wejściowej ulega przeniesieniu na wyjście stopniowo w sposób nieliniowy. Najczęściej spotykaną w praktyce strukturą opóźniającą jest opóźnienie rozłożone w czasie w sposób wykładniczy. Stosuje się przy tym opóźnienia wykładnicze różnych stopni, jednak wszystkie opóźnienia stopnia $n > 1$ oparte są o szeregowe połączenie ze sobą odpowiedniej liczby elementów opóźniających stopnia pierwszego. Przykładowe modele struktur opóźniających i generowane przez nie charakterystyki czasowe przedstawiono, na rysunkach 8–10.



Rys. 8. Model elementu generującego opóźnienie I rzędu i uzyskane przy jego użyciu charakterystyki; Źródło: opracowanie własne



Rys. 9. Model elementu generującego opóźnienie II rzędu i uzyskane przy jego użyciu charakterystyki; Źródło: opracowanie własne



Rys. 10. Model elementu generującego opóźnienie III rzędu i uzyskane przy jego użyciu charakterystyki; Źródło: opracowanie własne

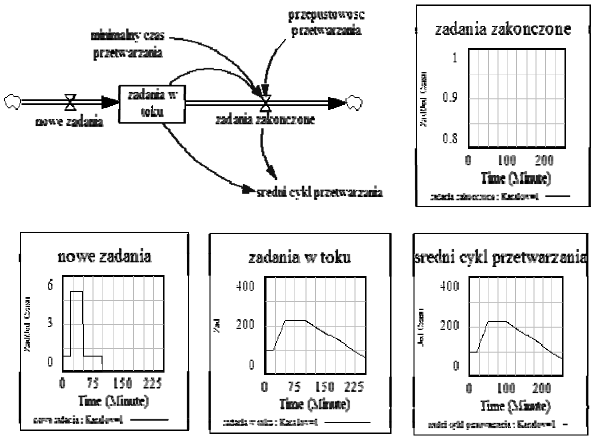
8. Przykłady zastosowań metody dynamiki systemowej

Metoda dynamiki systemowej dzięki połączeniu teorii oraz metod formalnych potrzebnych do analizowania złożonych systemów z pewną filozofią postrzegania skomplikowanych procesów zachodzących we współczesnym świecie tworzy doskonałe narzędzie do modelowania. Pozwala ona na budowanie modeli pozwalających na badanie problemów należących do wielu klas. Dzięki różnorodności zastosowań omawianą w niniejszym artykule metodę można z powodzeniem wykorzystać w modelowaniu m.in.:

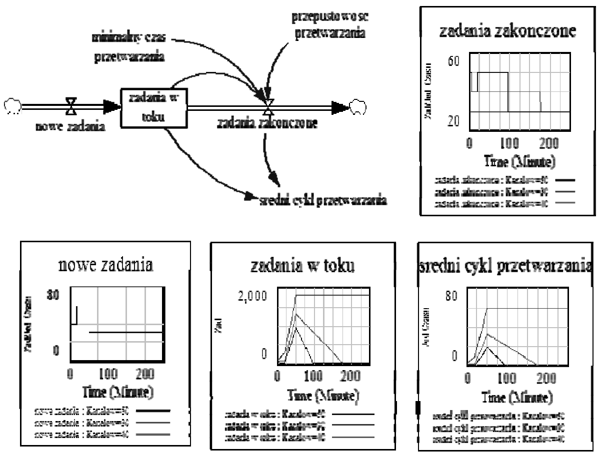
- systemów ekonomicznych
- systemów zarządzania
- systemów technicznych
- systemów produkcji
- systemów biologicznych
- systemów medycznych
- rozwoju organizacji
- rozwoju oprogramowania (niezawodności oprogramowania, szacowania kosztów wytwarzania oprogramowania, zarządzania projektami itp.)
- sterowania komponentami infrastruktury IT.

Poniżej przedstawiono struktury modeli wybranych systemów masowej obsługi (SMO) oraz generowane przez nie przykładowe charakterystyki:

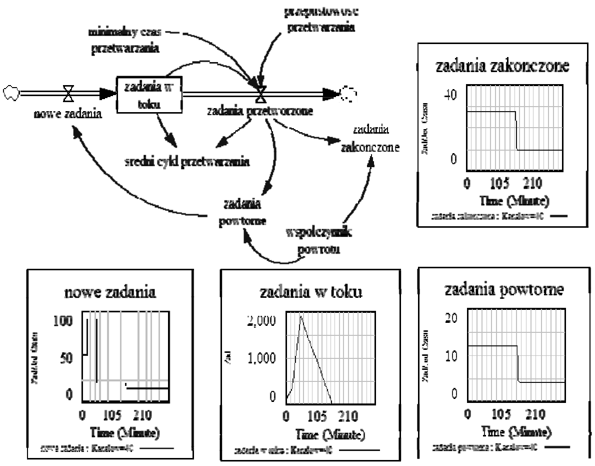
- model jednokanałowego (rysunek 11) i wielokanałowego (rysunek 12) SMO
- model wielokanałowego SMO pracującego w trybie konwersacyjnym (rysunek 13).



Rys. 11. Model jednokanałowego systemu obsługi z algorytmem FIFO i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji;
Źródło: opracowanie własne



Rys. 12. Model wielokanałowego systemu obsługi z algorytmem FIFO i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji;
Źródło: opracowanie własne



Rys. 13. Model systemu pracującego w trybie konwersacyjnym i uzyskane charakterystyki stanu systemu w przebiegu symulacji;
Źródło: opracowanie własne

9. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym artykule rozważania mają na celu dostarczenie i uporządkowanie w ramach zwartego opracowania podstawowej wiedzy teoretycznej z zakresu modelowania złożonych systemów w ujęciu dynamiki systemowej.

W ramach tej publikacji autorzy dokonali przeglądu metody dynamiki systemowej, którego celem było spójne przedstawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego tego podejścia do budowy modeli symulacyjnych. Dlatego w kolejnych punktach artykułu przedstawiono struktury używane podczas modelowania, omówiono proces modelowania i jego poszczególne etapy, opisano podstawy matematyczne budowy równań opisujących modelowany system i metody numeryczne wykorzystywane w rozwiązywaniu tych równań. Autorzy opisali również charakterystyki zachowań systemów dynamicznych i przedstawili przykładowe obszary zastosowań dla metody dynamiki systemowej. Omawiana w niniejszej pracy metoda modelowania jest stale rozwijana zarówno na świecie, jak i w Polsce, na co wskazuje rosnąca z roku na rok liczba publikacji z tego zakresu. Mnogość możliwych dziedzin, w których dynamika systemowa, jako narzędzie badań symulacyjnych, znajduje zastosowanie może z powodzeniem świadczyć o jej znaczeniu w badaniu złożonych systemów i zachodzących w nich procesów.

10. Bibliografia

[1] R. Coyle, ”The practice of system dynamics: Milestones, lessons and ideas from 30 years of experience”, *System Dynamics Review*, Vol. 14, 343–365 (1998).
[2] J.W. Forrester, *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge, 1961.
[3] J.W. Forrester, *The collected papers of Jay W. Forrester*, Wright-Allen Press, 1975.
[4] J.W. Forrester, *Urban Dynamics*, MIT Press, Cambridge, 1969.
[5] J.W. Forrester, *World Dynamics*, Wright-Allen Press, 1971.
[6] E. Kasperska, *Dynamika systemowa. Symulacja i optymalizacja*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
[7] E. Kasperska, D. Słota, *Metody matematyczne w zarządzaniu w ujęciu dynamiki systemowej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.

[8] R. Łukaszewicz, *Dynamika systemów zarządzania*, PWN, Warszawa 1975.
[9] T. Protasowicki, J. Stanik, „Ocena adekwatności modeli symulacyjnych dynamiki systemowej na przykładzie modelu *Earned Value*", materiały konferencyjne, XIX Warsztaty Naukowe PTSK *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, 2012.
[10] J. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin McGraw-Hill, Boston, 2000.
[11] R.J. Madachy, *Software Process Dynamics,* Wiley Interscience, New Jersey, 2008.
[12] Z. Fortuna, B. Macukow, J. Wąsowski, *Metody numeryczne*, WNT, Warszawa, 2005.
[13] A. Palczewski, *Równania różniczkowe zwyczajne. Teoria i metody numeryczne z wykorzystaniem komputerowego systemu obliczeń symbolicznych*, WNT, Warszawa, 2004.
[14] F. Morrison, *Sztuka modelowania układów dynamicznych deterministycznych, chaotycznych, stochastycznych*, WNT, Warszawa, 1996.
[15] J. Awrejcewicz, *Matematyczne modelowanie systemów*, WNT, Warszawa, 2007.

System dynamics method in the modeling of complex processes and systems

R. HOFFMANN, T. PROTASOWICKI

This paper presents the System Dynamics (SD) method, which allows to build a continuous simulation models. Paper contains a theoretical consideration on SD method and its potential applications in field of the simulation of complex systems and processes. Described method allows to model the structure and dynamics of complex systems, taking into account a feedback loops embedded within these systems. By considering the system as comprehensive and indivisible – in the meaning of its dynamics – developed simulation models allows for easy mapping and understanding the complex non-linear relationships between elements included to the model. SD method allows for easy adaptation of the constructed model to the current needs, to verify new hypotheses and new scenarios. These properties enables the SD method to be successfully used in modeling and analyzing the different classes of complex systems related to almost any problem domain.

Keywords: simulation, system dynamics, complex systems modeling.