

Złożone systemy adaptacyjne

<https://doi.org/10.33141/po.2007.11.01>

Przeгляд Organizacji, Nr 11 (814), 2007, ss. 3-6
www.przegladorganizacji.pl

Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa (TNOiK)

Czesław Mesjasz

Wprowadzenie

Odkrycie własności systemów nieliniowych określanych w uproszczeniu jako złożoność i chaos stało się podstawą do opracowania bardziej złożonych metod modelowania matematycznego, które w bardziej precyzyjny sposób pozwalają na opis i analizę działania systemów społecznych.

Złożone systemy adaptacyjne – ZSA (*Complex Adaptive Systems – CAS*) stanowią swego rodzaju podklasę systemów złożonych. Dzięki adaptacyjnym możliwościom elementów oraz traktowanych całościowo ZSA możliwe staje się opisywanie i analizowanie działania wszelkiego rodzaju organizacji, począwszy od przedsiębiorstw i ich elementów, poprzez sieci przedsiębiorstw, a na sektorach i całej gospodarce kończąc. Coraz bardziej złożonym elementom tych systemów nadaje się możliwości symulacji procesów poznawczych (kognitywnych), co pozwala na dokładniejsze modelowanie procesów decyzyjnych – zarówno na poziomie jednostki, jak i konsekwencji tych procesów na poziomie całości systemu.

Można wręcz postawić tezę, że złożone systemy adaptacyjne stanowią jak dotychczas najbardziej zaawansowaną metodę opisu i analizy systemów społecznych. Należy przy tym dodać, że o ile w literaturze światowej badania dotyczące złożonych systemów adaptacyjnych stanowią obecnie jeden z istotniejszych problemów teorii i praktyki zarządzania, o tyle w polskim piśmiennictwie nie poświęca się jeszcze temu zagadnieniu dostatecznej uwagi.

Celem artykułu jest przeгляд podstawowych cech złożonych systemów adaptacyjnych oraz wskazanie możliwości ich stosowania w modelowaniu i analizie organizacji. Opracowanie stanowi wstęp do dalszych badań teoretycznych, jak i też do opracowania modeli złożonych systemów adaptacyjnych, które w szerszym niż dotychczas zakresie umożliwiłyby opis i analizę procesów uczenia się organizacji i tworzenia wiedzy.

Podstawowe cechy złożonych systemów adaptacyjnych

Koncepcja złożonych systemów adaptacyjnych (ZSA) opracowana została w zajmującym się interdyscyplinarnymi badaniami w zakresie systemów złożonych Instytucie w Santa Fe (Santa Fe Institute) w stanie Nowy Meksyk w USA. Głównymi twórcami koncepcji złożonych systemów adaptacyjnych są: matematyk J.H. Holland oraz laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki, M. Gell-Mann.

Chociaż ZSA stanowią efekt pracy wielu badaczy, to na szczególne podkreślenie zasługuje wkład J. Hollanda, twórcy koncepcji obliczeń ewolucyjnych oraz algorytmów genetycznych, które stanowią pod-

stawę budowy matematycznych modeli złożonych systemów adaptacyjnych [J. Holland, 1995].

Badania dotyczące ZSA określa się czasem jako teoria złożoności (*complexity theory*) czy też nauka o złożoności (*complexity science*). Wykorzystanie terminów „teoria” czy też „nauka” nie wydaje się uzasadnione, chociażby ze względu na interdyscyplinarny charakter tych badań [C. Mesjasz, 2003], (New England Complex Systems Institute – NECSI).

Złożone systemy adaptacyjne mogą być wykorzystywane do modelowania wielu rodzajów systemów – rynki finansowe, kolonie zwierząt, systemy społeczne, systemy odpornościowe, sieci komputerowe, relacje pomiędzy państwami i wiele innych, podobnych obiektów złożonych z wielu elementów działających (*collectivities*), [C. Goldspink, 2000].

Podstawowym elementem złożonego systemu adaptacyjnego jest agent rozumiany w języku angielskim jako obiekt działający. Dlatego też w terminologii polskiej przyjęło się również stosowanie terminu „agent” oraz liczby mnogiej „agenty” czy też nawet „agenci”.

Biorąc pod uwagę problemy ze stosowaniem tego terminu w polskiej terminologii naukowej – nie tylko politycznej, warto byłoby zastanowić się, czy nie można wprowadzić jakiegoś polskiego odpowiednika dla tego terminu. Termin „agent” zarówno w języku polskim, jak i w języku angielskim ma nie tylko znaczenie dotyczące obiektu (podmiotu). Może lepszym określeniem byłby „element działający”?

Zgodnie z podstawową definicją, którą można wprowadzić z rozważań zawartych w pierwszych pracach dotyczących tego problemu, złożony system adaptacyjny stanowi dynamiczną sieć oddziałujących ze sobą podstawowych elementów (agentów), które mogą być traktowane jako modele komórek, gatunków, indywidualnych podmiotów (osób), elementów wszelkiego rodzaju sieci komputerowych, przedsiębiorstw czy też krajów. Elementy tej sieci działają równolegle, wpływając na inne elementy i reagując na ich wpływ. Wpływ ten polega na komunikacji, konfliktach, kooperacji i negocjacjach. W złożonym systemie adaptacyjnym brak jest jakiegokolwiek scentralizowanej kontroli. Elementy tego systemu pozostają w pełni autonomiczne, co oznacza, że mają one możliwość kontroli nad swymi stanami wewnętrznymi.

Jakiegokolwiek spójne działanie systemu jako całości wynika ze współpracy i konkurencyjnych działań elementów (agentów). Działanie całego systemu jest więc wynikiem bardzo dużej liczby decyzji podejmowanych w każdej chwili przez indywidualne elementy [M. Waldrop, 1992, J. Holland, 1995].

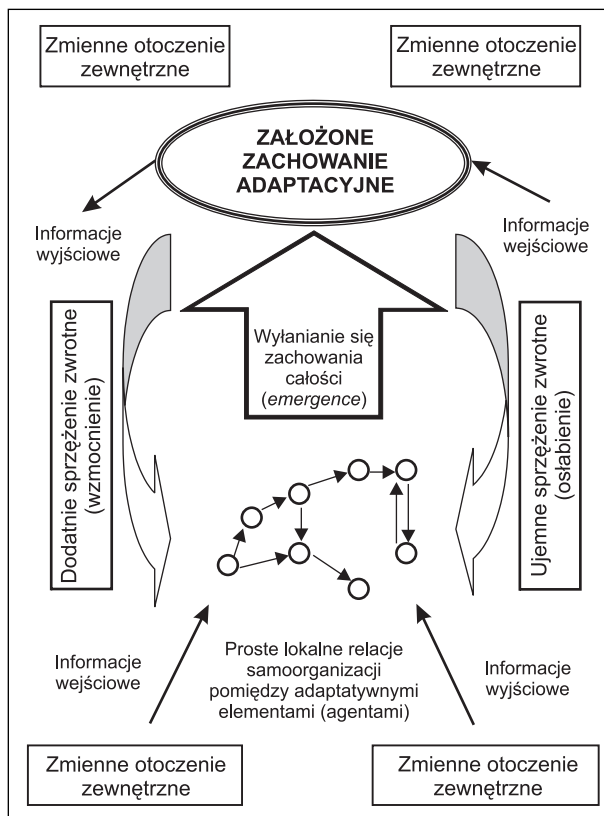
Należy jeszcze pamiętać o różnicy pomiędzy systemem agentowym (wieloagentowym) (*Multi-Agent System – MAS*) a złożonym systemem adaptacyjnym. System wieloagentowy można rozpatrywać w dwóch

ujęciach. W ujęciu ogólnym jest to system składający się z dużej liczby oddziałujących elementów (agentów) – (*agents*), które mogą reprezentować różnorodne obiekty. W ujęciu informatycznym agent stanowi element (reprezentację oprogramowania) – (*software agent*). Systemy wieloagentowe reprezentują oprogramowanie o charakterze rozproszonym wyróżniające się następującymi cechami: reaktywnością, autonomicznością, orientacją na cele, komunikatywnością, zdolnością do uczenia się, mobilnością, posiadaniem specyficznych, indywidualnych cech „charakteru”.

Traktowany w sposób uogólniony złożony system adaptacyjny stanowi specyficzny rodzaj systemu wieloagentowego wykazujący atrybuty określane mianem złożoności (*complexity*). Czyli oznacza to, że każdy złożony system adaptacyjny jest systemem wieloagentowym, natomiast relacja wynikania w drugą stronę nie zawsze jest prawdziwa.

Trzeba jednakże dodać, że obecne systemy oprogramowania określane jako systemy wieloagentowe stają się coraz bardziej złożone, np. poprzez nadawanie im cech sztucznej inteligencji. Ponadto modelowanie złożonych systemów adaptacyjnych odbywa się za pomocą systemów wieloagentowego oprogramowania rozproszonego. Dlatego też można wręcz stwierdzić, że rozróżnienie pomiędzy złożonymi systemami adaptacyjnymi a wieloagentowymi systemami oprogramowania wynika jedynie z perspektywy badawczej.

Złożony system adaptacyjny ma następujące cechy: samopodobieństwo (*self-similarity*), złożoność, wyłaniające się cechy (*emergence*) oraz samoorganizację. Złożone systemy adaptacyjne stanowią więc



Rys. 1. Zachowanie się złożonego systemu adaptacyjnego

Źródło: opracowanie własne.

swego rodzaju specyficzny rodzaj systemów wieloagentowych oraz wykorzystywanych w rozważaniach informatycznych systemy inteligentnych elementów działających.

Samopodobieństwo polega na tym, że całość systemu jest w pewien sposób podobna do swych elementów. Przykładem samopodobieństwa są obiekty matematyczne określane jako fraktale. Jak wspomniano we wcześniejszej części opracowania, złożoność nie ma jednoznacznej definicji. W przypadku ZSA złożoność wiąże się z wielowymiarowością (wieloaspektowością) zachowania tych systemów, niemożnością ich dekompozycji (efekt synergiczny), nieliniowością, samoorganizacją oraz wyłaniającymi się własnościami.

Kolejnym pojęciem opisującym zachowanie się złożonych systemów adaptacyjnych jest wyłanianie się zachowania lub cech tych systemów (*emergence*). Podobnie jak w przypadku złożoności brak jest jednoznacznie określonej definicji wyłaniania się zachowań i cech systemów. W najprostszym ujęciu łączy się je z intuicyjnie definiowaną synergią. Oznacza też ono, że na podstawie znajomości zachowania się i cech elementów danego systemu nie jest możliwe przewidywanie zachowania całości systemu.

Ostatnią cechą odróżniającą złożone systemy adaptacyjne od systemów wieloagentowych jest zdolność do samoorganizacji. Opiera się ona na mechanizmach sprzężenia zwrotnego, przede wszystkim ujemnego, chociaż dodatnie sprzężenie zwrotne też może wpływać na procesy samoorganizacji. Podobnie jak w pozostałych przypadkach, samoorganizacja jest trudna do jednoznacznego zdefiniowania. Stanowi ona jedno z centralnych pojęć fizyki, chemii, biologii czy też nauk społecznych. Samoorganizacja często jest wiązana z wyłaniającym się zachowaniem systemu. W każdej z dziedzin nauki samoorganizacja jest inaczej rozumiana. W fizyce wiąże się z procesami spontanicznego wzrostu uporządkowania, w chemii z procesami autokatalizy, w biologii z homeostazą, natomiast w naukach społecznych samoorganizacja stanowi jedną z podstawowych cech systemu rynkowego oraz demokratycznego systemu politycznego.

Metody modelowania

Opisane wcześniej ogólne cechy złożonych systemów adaptacyjnych wymagają dalszej konkretyzacji. Dotyczy to przede wszystkim elementów i cech tych systemów oraz metod modelowania stosowanych do ich badania.

Podstawowym elementem złożonych systemów adaptacyjnych jest element działający (agent). Pojęcie to ma obecnie dwa znaczenia. Pierwsze, stosowane w ujęciu ogólnym mówi, że elementy mogą być traktowane jako modele komórek, gatunków, indywidualnych podmiotów (osób), elementów wszelkiego rodzaju sieci komputerowych, przedsiębiorstw czy też krajów. W drugim ujęciu stosowanym w informatyce, w szczególności w rozważaniach dotyczących sztucznej inteligencji oraz zaawansowanych metod programowania, agent jest to system komputerowy zdolny do niezależnego działania w imieniu swoich użytkowników lub właścicieli (umiejący sam rozpoznać, co musi być zrobione, aby osiągnąć postawione cele bez pomocy użytkownika), [M. Wooldridge, 2002].

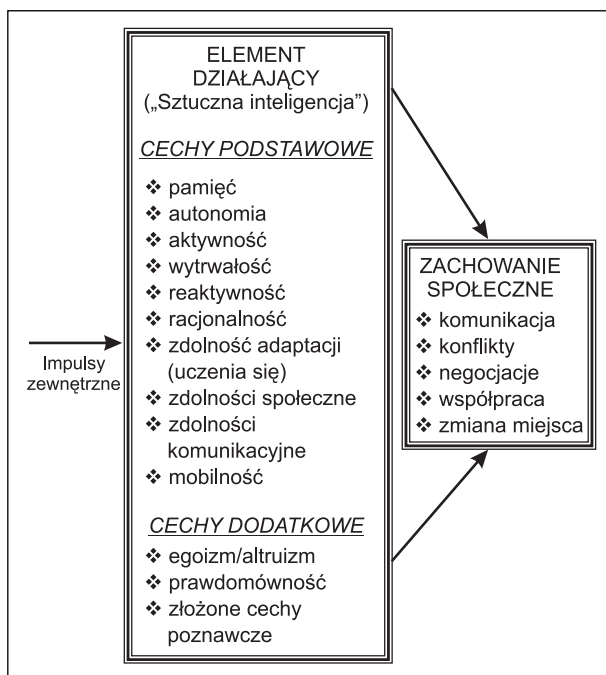
Zrozumienie zachowania złożonych systemów adaptacyjnych i innych systemów wieloagentowych wymaga odpowiedzi na dwa podstawowe pytania. Jak działają podstawowe elementy systemu? W jaki sposób mają być realizowane interakcje elementów działających – komunikacja, współpraca, negocjacje, tworzenie relacji władzy z innymi agentami? Pierwszy problem można określić jako projektowanie elementu działającego, natomiast drugi to projektowanie społeczeństwa (mikro/makro).

Podstawowy element działający

Każdy element działający (agent) w ZSA może być opisany za pomocą reguł zachowania. Opisują one, w jaki sposób dany agent reaguje na bodźce zewnętrzne, czyli przedstawiają ten element w relacji bodziec – reakcja. Znając ten zbiór reguł, można w dalszym postępowaniu określić sposoby adaptacji elementu działającego, czy też określając szerzej, sposoby jego uczenia się. Postępując w ten sposób dalej, można w sposób znaczący zwiększać repertuar zachowań, co prowadzi do sytuacji coraz częściej wspólnej dla modeli ZSA i modeli informatycznych, czyli nadawanie elementom działającym cech określanych jako „sztuczna inteligencja”.

Narzędzia modelowania ZSA

Modele złożonych systemów adaptacyjnych charakteryzują się odpowiednią strukturą hierarchiczną. Podstawę ich modelowania stanowią algorytmy genetyczne (*genetic algorithms*), [D. Goldberg, 1995], sieci neuronowe (*neural networks*), [J. Żurada i in., 1996], automaty komórkowe (*cellular automata*), sieci rozmyte (*fuzzy networks*) oraz inne metody modelowania mate-



Rys. 2. Cechy podstawowego elementu złożonego systemu adaptacyjnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie: [J. HOLLAND, 1995, M. WOOLDRIDGE, 2002].

matycznego. Natomiast na pierwszym, najniższym poziomie znajdują się odpowiednie klasyczne języki programowania. Ze względu na cel badawczy ich szczegółowe omówienie wychodzi poza zakres niniejszego opracowania.

Przykładem języka opracowanego specjalnie dla modelowania ZSA jest język NetLogo opracowany przez Ury'ego Wilensky'ego w 1999 roku i jest dalej rozwijany w ramach Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling w Northwestern University w Evanston w stanie Illinois w USA. NetLogo jest szczególnie odpowiedni do modelowania dynamiki złożonych systemów. Pozwala on na modelowanie zachowania setek, a nawet i tysięcy autonomicznych agentów, co umożliwia badanie zjawisk wyłaniania się zachowań i własności systemów.

NetLogo jest językiem bardzo uniwersalnym, gdyż pozwala na modelowanie zjawisk występujących w różnorodnych złożonych zbiorowościach w fizyce, chemii, biologii, medycynie, psychologii i w naukach społecznych. Modele z zakresu nauk społeczeństwa (*Artificial Society*) dotyczą rozprzestrzeniania się AIDS, konfliktów i kooperacji w systemach społecznych, rozprzestrzeniania się plotek (*Rumor*), finansów i bankowości, czy też wreszcie modele zachowania uczestników sytuacji opisywanych za pomocą teorii gier. Obecnie bardzo dużą popularnością zaczynają się cieszyć modele systemów komunikacji i ruchu drogowego, w tym ruchu drogowego w wielkich aglomeracjach miejskich oparte na ZSA i wykorzystujące język NetLogo.

Powyższe przykłady nie wyczerpują oczywiście wszystkich możliwości stosowania języka NetLogo. Należy przy tym dodać, że język ten jest wykorzystywany w celach dydaktycznych, zarówno do budowy modeli, jak i do analizy ich zachowania.

NetLogo nie jest oczywiście jedynym przykładem języka zbudowanego do modelowania systemów wieloagentowych czy też złożonych systemów adaptacyjnych. Często jako narzędzie budowy tych systemów wykorzystuje się bardziej złożone metodyki, takie jak na przykład SWARM, MaSE (*Multi-agent Systems Engineering*) czy też JADE (*Java Agent DEvelopment Framework*), [P. Cuesta-Morales i in., 2004].

Obszary zastosowań

Złożone systemy adaptacyjne znalazły bardzo wiele zastosowań w teorii i praktyce zarządzania. Wykorzystywane być one mogą na dwa sposoby.

W pierwszym przypadku ze względu na fakt, że stanowią one jak dotychczas najbardziej zaawansowane narzędzie modelowania systemów społecznych, mogą być wykorzystywane jako narzędzie teorii do opisu, analizy, predykcji i tworzenia wzorców. Jak też zostało wspomniane wcześniej, ZSA stanowią w teorii i praktyce zarządzania istotne narzędzie heurystyczne, gdyż niektóre wyłaniające się cechy systemów społecznych nie są w pełni przewidywalne, a dzięki nieliniowym modelom adaptacyjnym istnieją szanse na uzyskanie wariantów tego właśnie rodzaju.

Drugim obszarem wykorzystania ZSA w zarządzaniu, w znacznym stopniu pokrywającym się z pierwszym, jest wspomaganie realnych procesów decyzyjnych i wykonawczych za pomocą metod sy-

mulacji opartych na modelowaniu wieloagentowym. W obydwu przypadkach w coraz większym zakresie uwzględnia się stosowanie złożonych modeli, w których elementy mają cechy sztucznej inteligencji.

W wykorzystaniu modeli opartych na złożonych systemach adaptacyjnych należy wziąć pod uwagę następujące cechy tych systemów:

- komunikację pomiędzy elementami działającymi,
- konflikty i negocjacje,
- zapewnienie właściwej koordynacji,
- przekazywanie informacji,
- minimalizację czasu realizacji,
- integracje modeli tworzonych w różnych systemach.

Zakończenie

Na podstawie przeprowadzonej analizy wstępnej można w pełni zgodzić się ze stwierdzeniem, że złożone systemy adaptacyjne (ZSA) stanowią obecnie najbardziej zaawansowaną metodę modelowania systemów społecznych, w tym organizacji uczącej się i tworzącej wiedzę. Można dodać, że ZSA stanowią doskonałe narzędzie opisu i analizy działania zarówno złożonych systemów informacyjnych, od poziomu organizacji do poziomu internetu, jak też i złożonych systemów społecznych, które w pewien sposób można interpretować jako systemy komunikacji, albo też jako systemy fizyczne w istotnym stopniu działające dzięki komunikacji, np. systemy produkcyjne czy systemy logistyczne.

dr hab. Czesław Mesjasz

Katedra Procesu Zarządzania

Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie

BIBLIOGRAFIA

- [1] CUESTA-MORALES P. i in., *Developing a Multi-Agent System Using MaSE and JADE*, „UPGRADE” 2004, vol. V, no. 4.
- [2] GOLDBERG D.E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, WNT, Warszawa 1995.
- [3] GOLDSPINK C., *Modelling Social Systems as Complex: Towards a social simulation meta-model*, „Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)” 2000, vol. 3, no. 2, <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/3/2/1.html>.
- [4] HOLLAND J.D., *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*, Basic Books, New York 1995.
- [5] MESJASZ C., *Nauki o zarządzaniu a teoria systemów złożonych*, „Organizacja i Kierowanie” 2003, nr 4 (114).
- [6] NetLogo, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs>.
- [7] SWARM Development Group, http://www.swarm.org/wiki/Main_Page.
- [8] WALDROP M. M., *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, Simon & Schuster, New York 1992.
- [9] WOOLDRIDGE M., *An Introduction to MultiAgent Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 2002; <http://www.csc.liv.ac.uk/~mjw/pubs/imas>.
- [10] ŻURADA J., BARSKI M., JĘDRUCH W., *Sztuczne sieci neuronowe: podstawy teorii i zastosowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.

Summary

An introductory survey of properties and applications of Complex Adaptive Systems (CAS) is presented. It is emphasized that CAS are likely the most useful instruments of mathematical modeling in theory and practice of management. They can be also viewed as a fundamental method of modeling of learning organizations.