

AGATA WAWRZYŃIAK

Uniwersytet Szczeciński

OCENA I WYBÓR OPROGRAMOWANIA DO SYMULACJI WIELOAGENTOWEJ Z ZASTOSOWANIEM METODY AHP

Wprowadzenie

Od wielu lat symulacja komputerowa jest metodą służącą do rozwiązywania problemów w wielu dziedzinach wiedzy. Metoda ta polega na utworzeniu modelu symulacyjnego obiektu lub systemu w postaci matematyczno-logicznego zapisu i przedstawieniu zależności opisujących symulowany obiekt lub system rzeczywisty oraz jego otoczenie w taki sposób, że zależności te można badać przez zmiany wartości sygnałów wejściowych i parametrów modelu. Symulacja komputerowa jest metodą odtwarzania zjawisk zachodzących w świecie rzeczywistym za pomocą ich zmatematyzowanych modeli definiowanych i obsługiwanych przy użyciu programów komputerowych¹.

Symulacja wieloagentowa jest jedną z technik symulacyjnych, które zyskały w ostatnich latach dużą popularność jako metody wspomaganie decyzji. Modele oparte na agentach tworzy się do rozwiązywania problemów w wielu dziedzinach nauki². W symulacji wieloagentowej badany układ jest modelo-

¹ A. Maciąg, R. Pietroń, S. Kukła, *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, PWE, Warszawa 2013, s. 154.

² Por. T. Salamon, *Design of Agent-Based Models. Developing Computer Simulations for a Better Understanding of Social Processes*, Eva & Tomas Bruckner Publishing, Repin-Zivonin 2011, s. 14.

wany jako zbiór autonomicznych jednostek zwanych agentami. W modelu wieloagentowym opisuje się procesy decyzyjne w mikroskali, dla każdego agenta z osobna. Z połączenia działań wielu agentów i ich interakcji ze sobą nawzajem i ze środowiskiem, w którym funkcjonują, powstaje obraz badanego zjawiska w makroskali³. Agent jest to system komputerowy, który jest umiejscowiony w pewnym środowisku i jest zdolny do podejmowania autonomicznych działań służących do realizacji jego celów projektowych⁴. Z praktycznego punktu widzenia można założyć, że agent ma następujące cechy⁵:

- jest identyfikowalną jednostką posiadającą pewien zbiór cech i reguł zarządzających jej zachowaniem się i możliwościami decyzyjnymi;
- jest umiejscowiony w środowisku, w którym współdziała z innymi agentami;
- jego działanie może być skierowane na osiągnięcie określonego celu;
- jest autonomiczny, może funkcjonować niezależnie w swoim środowisku i w kontaktach z innymi agentami, przynajmniej w zakresie pewnych zdefiniowanych sytuacji;
- jest elastyczny, ma zdolność do uczenia się i adaptacji.

Posługiwanie się symulacją wieloagentową oznacza przestrzeganie pewnej określonej procedury modelowania⁶, której realizacja powinna być wspierana odpowiednio dobranym oprogramowaniem komputerowym. Wychodząc naprzeciw tym potrzebom, w ostatnich kilku latach nastąpił znaczący rozwój

³ P.O. Siebers, U. Aickelin, *Introduction to multi-agent simulation*, w: *Encyclopedia of Decision Making and Decision Support Technologies*, red. F. Adam, P. Humphreys, Idea Group Publishing, Pennsylvania 2008, s. 554–564.

⁴ Por. S. Bieniasz, *Techniki symulacji agentowej w zastosowaniu do badania procesów cieplnych*, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH, Kraków 2006, s. 13, winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy/9711/full9711.pdf (16.06.2013); M. Wooldridge, N.R. Jennings, *Intelligent agents: Theory and practice*, „The Knowledge Engineering Review” 1995, No. 10 (2), s. 119.

⁵ Ch.M. Macal, M.J. North, *Tutorial on agent-based modeling and simulation, Part 2. How to model with agent*, w: *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, red. L.F. Perrone i in., WSC 2006, Monterey 2006, s. 73–83, www.informs-sim.org/wsc06papers/008.pdf (16.06.2013).

⁶ Opis procedury modelowania wieloagentowego można znaleźć w pracy: M. Łatuszyńska, A. Wawrzyniak, B. Wąsikowska, F. Furaji, *Zastosowanie zbiorów przybliżonych do wykrywania reguł zachowania konsumentów na potrzeby wieloagentowego modelu symulacyjnego*, w: *Uwarunkowania zastosowań systemów informatycznych w gospodarce*, red. W. Chmielarz, *Problemy Zarządzania*, Vol. 10, No. 3 (38), Wydawnictwo Naukowe Wydziału Zarządzania UW, Warszawa 2012, s. 108.

oprogramowania do modelowania i symulacji wieloagentowej. Pakiety symulacyjne stały się bardziej kompleksowe i uniwersalne. Obecnie na rynku są dostępne różne programy symulacyjne, od najprostszych – stworzonych na bazie matematycznych modeli, do najbardziej rozbudowanych – z aparatem stochastycznym umożliwiającym na przykład dopasowywanie danych wejściowych do właściwego rozkładu, ze środowiskiem do tworzenia animacji, grafiki 3D, bogatymi narzędziami do prezentacji danych wyjściowych z symulacji. Można wyróżnić trzy główne typy oprogramowania dla symulacji wieloagentowej, tj. specjalistyczne oprogramowanie symulacyjne dedykowane do określonej dziedziny zastosowania, narzędzia symulacyjne ogólnego przeznaczenia oraz języki programowania przeznaczone do samodzielnego przygotowania programu symulacyjnego. Proces wyboru odpowiedniego pakietu oprogramowania jest uzależniony od wymagań modelowania, liczby dostępnych pakietów oraz kryteriów oceny zdefiniowanych przez modelującego⁷.

Celem artykułu jest analiza oprogramowania do modelowania i symulacji wieloagentowej należących do drugiego typu, tj. do narzędzi symulacyjnych ogólnego przeznaczenia. Ocenie zostały poddane następujące programy: AnyLogic, Ascape, NetLogo, Repast i StarLogoTNG. Zostały one wybrane ze względu na ich popularność i rozbudowane funkcjonalności.

1. Wybrane narzędzia modelowania w symulacji wieloagentowej

1.1. AnyLogic

AnyLogic jest wielofunkcyjnym pakietem służącym do modelowania i symulacji przy użyciu trzech metod: dynamiki systemów, symulacji dyskretnej oraz symulacji wieloagentowej. Przy czym dozwolone są kombinacje powyższych metod w ramach jednego modelu. Uniwersalność tego rozwiązania jest unikatowa na rynku tego typu oprogramowania. Narzędzie zostało opracowane przez firmę XJ Technologies. Jest rozwinięciem projektu COVERS (*Concurrent Verification and Simulation*) opracowanego w latach 90. ubiegłego wieku.

⁷ R. Zdanowicz, *Dobór oprogramowania do modelowania i symulacji procesów wytwarzania*, „Pomiary Automatyka i Robotyka” 2006, nr 1, s. 17.

Pierwsza wersja programu ukazała się w roku 2000, od tego czasu narzędzie jest systematycznie rozwijane (aktualna wersja oznaczona jest numerem 6.9.0). Program AnyLogic działa w środowisku Windows, Mac OS i Linux⁸.

1.2. Ascape

Ascape jest narzędziem do tworzenia i symulacji modeli wieloagentowych. Według założenia twórców program miał być elastyczny i wydajny, a także przejrzysty i łatwy w użyciu. W Ascape modele można opracowywać przy użyciu znacznie mniejszej ilości kodu niż w innych konkurencyjnych narzędziach, a duże modyfikacje modeli mogą być wykonywane przy minimalnych zmianach w kodzie. Program oferuje szeroki wachlarz narzędzi do modelowania i wizualizacji. Ascape został w całości napisany w Javie i działa w dowolnym systemie operacyjnym, w którym została zainstalowana platforma Java⁹.

1.3. NetLogo

NetLogo jest językiem programowania i zintegrowanym środowiskiem modelowania matematycznego, którego autorem jest Juri Wilenski. Język NetLogo został zaprojektowany na bazie języka Logo. Pierwsza wersja pojawiła się w 1999 roku, projekt jest rozwijany do dzisiaj. Jego twórca kierował się zasadą „niski próg i brak sufitu” – język ma umożliwić pracę nowicjuszom, a jednocześnie sprostać potrzebom zaawansowanych użytkowników. NetLogo nie wymaga, w przeciwieństwie do innych języków obiektowych, posiadania dużych umiejętności programistycznych. Eksperymenty symulacyjne są wykonywane w postaci przypominającej proste aplety Javy z wykorzystaniem prostych i efektywnych narzędzi wizualizacji. Program ma wbudowaną obszerną bibliotekę modeli z różnych dziedzin, takich jak ekonomia, biologia, fizyka, chemia, psychologia¹⁰.

⁸ Szczegółowe informacje na temat programu AnyLogic dostępne są na stronie producenta: www.anylogic.com (20.07.2013).

⁹ Więcej informacji na temat programu można znaleźć na stronie: ascape.sourceforge.net (20.07.2013).

¹⁰ Dokumentacja NetLogo dostępna jest na stronie: [ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/NetLogo User Manual.pdf](http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/NetLogo%20User%20Manual.pdf) (20.07.2013).

1.4. Repast

Repast (*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*) to jedno z dostępnych narzędzi do modelowania systemów wieloagentowych. Cechą wyróżniającą Repast jest implementacja dostępna dla różnych języków (.Net, Java, Python), udostępniana na licencji open-source. Program powstał na uniwersytecie w Chicago. Repast w całości opiera się na obiektowym języku programowania Java. Mimo pewnych ułatwień dla niezaawansowanych użytkowników do tworzenia modeli wymagana jest przynajmniej podstawowa znajomość składni Javy. Narzędzie przystosowane jest głównie do symulacji zjawisk z dziedziny nauk społecznych¹¹.

1.5. StarLogo TNG

StarLogo jest rozwijanym przez MIT Media Lab językiem modelowania wieloagentowego opartym na języku programowania Logo. W 2008 roku udostępniono pierwszą wersję StarLogo TNG (*The Next Generation*), która umożliwia pracę w środowisku graficznym 3D oraz w założeniu bardziej przyjazny interfejs użytkownika oparty na łączeniu bloczków¹².

2. Problem doboru oprogramowania symulacyjnego

Wybór odpowiedniego oprogramowania symulacyjnego jest z jednej strony zadaniem trudnym i złożonym, z drugiej strony może przynieść wiele korzyści użytkownikowi takiego systemu (przede wszystkim w zakresie zwiększenia efektywności i poprawności tworzonych modeli, przy jednoczesnym zmniejszeniu pracochłonności).

¹¹ Więcej informacji na temat programu Repast można znaleźć na stronie: repast.sourceforge.net (20.07.2013).

¹² Informacje dotyczące programu StarLogo TNG dostępne są na stronie: education.mit.edu/projects/starlogo-tng (20.07.2013).

Podjęcie decyzji o wyborze oprogramowania można podzielić na kilka etapów:

- ustalenie wymagań modelowania i wstępny przegląd dostępnego na rynku oprogramowania,
- stworzenie listy kryteriów oceny,
- ocena oprogramowania pod względem spełniania kryteriów,
- wybór najlepszego oprogramowania.

W ramach pierwszego etapu należy zdefiniować rodzaj systemu, który ma być zamodelowany, oraz określić kompleksowość realizacji modelowania. Mając zdefiniowane wymagania modelowania, można sporządzić wstępną listę dostępnego oprogramowania symulacyjnego. Sporządzenie listy oprogramowania z krótkimi ogólnymi charakterystykami ułatwia dokonanie wyboru zgodnie z ustalonymi wcześniej wymaganiami. Celem sporządzenia takiej listy jest wyeliminowanie produktów, które nie spełniają wymagań symulacyjnych. Po wybraniu kilku pakietów oprogramowania można przejść do ich bardziej szczegółowej analizy.

Dokonanie skutecznego porównania pakietów oprogramowania symulacyjnego wymaga stworzenia listy kryteriów oceny. Należy je dobrać pod względem potrzeb użytkownika i wymagań procesu modelowania. Jednym z głównych problemów osoby oceniającej oprogramowanie jest brak jednoznacznych ilościowych mierników, na podstawie których można dokonać analizy. Wiele kryteriów, które można wskazać jako podstawę oceny, jest uzależnionych od konkretnego scenariusza i nie znajduje zastosowania w zmienionych warunkach. Dlatego też należy rozważyć zastosowanie takiej metody oceny, która może zostać oparta także na kryteriach o charakterze jakościowym.

W przeprowadzonych badaniach (zostaną omówione w dalszej części artykułu) wybrane zostały kryteria, które można podzielić na cztery grupy: kryteria dotyczące modelowania, kryteria dotyczące zawartości modelu, czyli określające, które aspekty procesu biznesowego zostały nim objęte (obejmuje to perspektywy: funkcjonalną, dynamiczną, informacyjną i organizacyjną¹³), kryteria dotyczące analizy i symulacji oraz kryteria ogólne, takie jak na przykład cena. Szczegółowe zestawienie wszystkich przyjętych kryteriów oceny oprogramowania razem z opisem zawarto w tabeli 1.

¹³ Wymienione perspektywy odnoszą się do perspektyw podziału zaproponowanego w pracy: B. Curtis, M. Kellner, J. Over, *Process Modeling*, „Communications of the ACM” 1992, No. 35 (9), s. 75–90.

Tabela 1

Kryteria oceny oprogramowania do modelowania wieloagentowego

Kryteria		Opis
K1	Tworzenie i testowanie modelu	Łatwość budowania modelu, występowanie opcji testującej i sprawdzającej błędy, maksymalny rozmiar modelu, maksymalny wymiar obiektów, możliwość tworzenia dokumentacji, występowanie opcji „Pomoc”, występowanie opcji „Asystent”
K2	Wewnętrzny język programowania	Możliwość korzystania z wewnętrznego języka programowania i ewentualny dostęp do kodu źródłowego
K3	Perspektywa funkcjonalna	Odwzorowywanie funkcjonalnych zależności między elementami procesu – czynności, podprocesy itp.
K4	Perspektywa dynamiczna (behawioralna)	Odwzorowywanie sposobu wykonywania elementów procesu, np. czy sekwencyjnie, sprzężenia zwrotne, iteracje, czas wykonania i definiowanie, kiedy elementy procesu są wykonywane – warunki podejmowania decyzji, kryteria wejść i wyjść
K5	Perspektywa informacyjna	Opis jednostek informacji (encji) produkowanych lub używanych przez proces. Jednostkami informacji mogą być dane, produkty (pośrednie i końcowe) i obiekty. Ta perspektywa odwzorowuje strukturę jednostek informacyjnych i związki między nimi
K6	Perspektywa organizacyjna	Określa, kto wykonuje każdą czynność i gdzie (w jakiej jednostce organizacyjnej), a także fizyczne media i lokalizacje użyte do składowania elementów procesu
K7	Wprowadzanie danych i możliwość ich analizy	Możliwość dystrybucji danych, pobierania danych z empirycznych źródeł i importu danych z innych programów
K8	Raportowanie i analiza danych na wyjściu	Możliwość sporządzania raportów dla obiektów modelu, możliwość raportów graficznych, możliwość redagowania raportów przez użytkownika, możliwość eksportowania raportów do innych programów, statystyczna analiza wyników
K9	Możliwości wizualne	Graficzne budowanie modelu, czy obraz jest w czasie rzeczywistym czy odtwarzany, szybkość wyświetlania obrazu, animacja, możliwość tworzenia ikon przez użytkownika, występowanie biblioteki ikon, możliwość pomniejszania i powiększania obrazu
K10	Cena	Cena sprzedaży oraz koszty: utrzymania, wsparcia technicznego, szkolenia, czas opanowania umiejętności obsługiwanego oprogramowania, możliwość uzyskania licencji użytkownika
K11	Wymagania sprzętowe i programowe	Współpraca z systemami operacyjnymi, platforma sprzętowa, oprogramowanie zabezpieczające, dostęp do Internetu/stron WWW
K12	Gwarancja i wsparcie producenta	Dostępność pomocy technicznej, możliwość konsultacji, technicznych, rodzaj oferowanego szkolenia, częstotliwość aktualizacji oprogramowania, wersje obcojęzyczne, jakość dokumentacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie: B. Curtis, M. Kellner, J. Over...; R. Zdanowicz, *Dobór oprogramowania do modelowania i symulacji procesów wytwarzania*, „Pomiary Automatyka i Robotyka” 2006, nr 1, s. 10–17.

Następnie każdy pakiet oprogramowania należy ocenić pod względem spełniania przez niego ustalonych wcześniej kryteriów. Należy tutaj podkreślić, że samo stwierdzenie, iż dane oprogramowanie spełnia podane kryteria lub nie spełnia ich, jest niewystarczające. Właściwym rozwiązaniem jest ustalenie punktacji, na przykład w skali od 1 do 5, w której 1 oznacza bardzo niską zgodność z kryterium, 2 – słabą zgodność z kryterium, 3 – wystarczającą zgodność z kryterium, 4 – dużą zgodność z kryterium, 5 – bardzo dużą zgodność z kryterium.

W tabeli 2 zawarto oceny punktowe uzyskane przez 5 wybranych programów do symulacji wieloagentowej.

Tabela 2

Porównanie programów symulacyjnych

Kryteria		Programy				
		AnyLogic	Ascape	NetLogo	Repast	StarLogo TNG
K1	Tworzenie i testowanie modelu	4	4	2	3	2
K2	Wewnętrzny język programowania	4	4	3	5	1
K3	Perspektywa funkcjonalna	4	4	3	4	4
K4	Perspektywa dynamiczna	5	3	2	3	3
K5	Perspektywa informacyjna	4	4	2	3	3
K6	Perspektywa organizacyjna	4	3	2	3	2
K7	Wprowadzanie danych i możliwości ich analizy	3	3	4	3	2
K8	Raportowanie i analiza danych na wyjściu	3	4	2	3	2
K9	Możliwości wizualne	4	4	2	3	5
K10	Cena	1	4	3	4	5
K11	Wymagania sprzętowe i programowe	4	5	4	5	3
K12	Gwarancja i wsparcie producenta	4	3	2	3	1

Źródło: obliczenia własne.

Ostatnim krokiem przyjętej procedury jest właściwy wybór oprogramowania. Na tym etapie można wybrać program, który uzyskał największą sumaryczną liczbę punktów, lub dokonać wyboru, opierając się na bardziej zaawansowanej metodzie, na przykład metodzie hierarchicznej analizy problemu – AHP.

3. Metoda AHP

Do najbardziej znanych wielokryterialnych metod wspomagania decyzji można zaliczyć programowanie wielokryterialne, ELECTRE I, II, III, IV, PROMETHEE I i II, MAPPACC, PRAGMA, sztuczne sieci neuronowe, DEA, metodę eliminacji, łańcuchy Markowa, MCDA, VDA, AHP i ANP. Każda z wymienionych wielokryterialnych metod podejmowania decyzji ma zalety, jak również pewne ograniczenia. Spośród nich za najlepsze (w USA, Japonii, Chinach, Indonezji i niektórych krajach Europy Zachodniej) uznano AHP i ANP¹⁴. Z tego powodu w badaniach zdecydowano się zastosować metodę hierarchicznej analizy problemu (*Analytic Hierarchy Process*).

Metodę AHP opracował amerykański matematyk Thomas L. Saaty, który prace nad budową algorytmu rozpoczął w latach 70. ubiegłego wieku. Podejście zaproponowane przez Saaty'ego łączy w sobie elementy matematyki i psychologii. Jest stosowane do rozwiązywania problemów decyzyjnych, szczególnie w sytuacjach, kiedy kryteria mają charakter jakościowy, a oceny są subiektywne i wynikają z wiedzy i doświadczenia analityka. Liczne zastosowania tej metody we wspomaganiu decyzji ekonomicznych, technicznych czy społecznych potwierdzają jej przydatność szczególnie w tych zastosowaniach, gdzie znaczna część kryteriów oceny ma charakter jakościowy, a doświadczenie oceniającego stanowi główne źródło ocen, mających charakter subiektywny. Ograniczenie obliczeń w metodzie AHP do algebry liniowej i rachunku wektorowego ułatwia implementację komputerową oraz stosowanie metody w praktyce decyzyjnej¹⁵.

Metodę AHP realizuje się w czterech następujących krokach:

- a) budowa modelu hierarchicznego, dekompozycja problemu decyzyjnego i budowa hierarchii kryteriów wpływających na rozwiązanie problemu;
- b) ocena przez porównania parami, zebranie ocen porównania parami kryteriów oraz wariantów decyzyjnych, przez zastosowanie względnej skali dominacji przyjętej w metodzie AHP,

¹⁴ W. Adamus, P. Łasak, *Zastosowanie metody AHP do wyboru umiejscowienia nadzoru nad rynkiem finansowym*, „Bank i Kredyt” 2010, nr 41 (4), s. 77.

¹⁵ O. Downarowicz, J. Krause, M. Sikorski, W. Stachowski, *Zastosowanie metody AHP do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego*, w: *Wybrane metody ergonomii i nauki o eksploatacji*, red. O. Downarowicz, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2000, s. 2.

c) wyznaczenie preferencji globalnych i lokalnych, określenie wzajemnych priorytetów (istotności) w odniesieniu do kryteriów i wariantów decyzyjnych;

d) klasyfikacja wariantów decyzyjnych, wyznaczenie uporządkowania wariantów decyzyjnych ze względu na ich udział w realizacji celu nadrzędnego¹⁶.

4. Wybór najlepszego programu z zastosowaniem metody AHP

W omawianych badaniach celem zastosowania metody AHP był wybór najlepszego programu do modelowania i symulacji wieloagentowej. Zgodnie z założeniami metody AHP w pierwszym etapie przeprowadza się porównania kryteriów parami, korzystając z ocen punktowych. W tym celu przyjęto następującą skalę ważności kryteriów¹⁷:

- 1 – porównywalne (A równe B),
- 3 – słaba preferencja (A słabo preferowane w stosunku do B),
- 5 – silna preferencja (A silnie preferowane w stosunku do B),
- 7 – bardzo silna preferencja (A bardzo silnie preferowane w stosunku do B),
- 9 – maksymalna preferencja (A maksymalnie preferowane w stosunku do B),
- 2, 4, 6, 8 – wartości pośrednie.

Skala ważności kryteriów umożliwia wykorzystanie doświadczeń i wiedzy osoby podejmującej decyzje oraz pozwala na wskazanie, ile razy dany element przeważa nad innym, na przykład w odniesieniu do danego kryterium. Osoba może wyrazić swoje oceny każdej pary elementów. Najpierw słownie, a następnie preferencje są zapisywane w postaci liczb, jako 1, 3, 5, 7, 9. Ponadto wprowadzane są liczby pośrednie (parzyste – 2, 4, 6, 8).

Proces porównania kryteriów opiera się na skali ważności danego kryterium, dlatego w macierzy porównawczej są wpisywane także odwrotności oceny punktowej (por. tabela 3). Macierz $A = [a_{ij}]$ ma na przekątnej wartość 1

¹⁶ *Ibidem*, s. 3; T.L. Saaty, *Decision making with the analytic hierarchy proces*, „International Journal of Services Sciences” 2008, Vol. 1, No. 1, s. 85.

¹⁷ Thomas L. Saaty opracował 27 różnych skal. Spośród nich największe zastosowanie ma dziewięciostopniowa fundamentalna skala porównań, którą wykorzystano również w niniejszej pracy.

oraz własność $a_{ji} = 1/a_{ij}$. W każdej kolumnie macierzy A sumujemy oceny a_{ij} według zależności:

$$k_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} . \quad (1)$$

Tabela 3

Fragment macierzy ważności kryteriów

Kryteria	K1	K2	K3	K4	K5	K6	...	K12
K1	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	3,00	...	5,00
K2	1,00	1,00	3,00	3,00	5,00	3,00	...	5,00
K3	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	1,00	...	3,00
K4	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	1,00	...	3,00
K5	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,33	...	1,00
K6	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	1,00	...	3,00
K7	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,33	...	1,00
K8	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	1,00	...	3,00
K9	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,33	...	1,00
K10	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,33	...	1,00
K11	0,14	0,14	0,20	0,20	0,33	0,20	...	0,33
K12	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,33	...	1,00
Suma	4,48	4,48	11,87	11,87	27,33	11,87	...	27,33

Źródło: obliczenia własne.

Następnie przeprowadza się normowanie kryteriów. W pierwszym kroku wyznacza się wartości macierzy $B = [b_{ij}]$:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{k_j} , \quad (2)$$

gdzie:

a_{ij} – wartości oceny programu,

b_{ij} – suma wartości ocen w danej kolumnie,

k_j – suma ważności kryteriów z macierzy A.

W kolejnym kroku oblicza się wektor sum częściowych:

$$s_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (3)$$

oraz wagi kryteriów:

$$w_i = \frac{s_i}{n}, \quad (4)$$

gdzie:

$i = 1, \dots, n$.

Macierz wag kryteriów przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

Znormalizowana macierz kryteriów i wektor priorytetów

Kryteria	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	Waga (w_i)	
K1	0,22	0,22	0,25	0,25	0,18	0,25	0,18	0,25	0,18	0,18	0,14	0,18	W1	0,21
K2	0,22	0,22	0,25	0,25	0,18	0,25	0,18	0,25	0,18	0,18	0,14	0,18	W2	0,21
K3	0,07	0,07	0,08	0,08	0,11	0,08	0,11	0,08	0,11	0,11	0,10	0,11	W3	0,09
K4	0,07	0,07	0,08	0,08	0,11	0,08	0,11	0,08	0,11	0,11	0,10	0,11	W4	0,09
K5	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	W5	0,04
K6	0,07	0,07	0,08	0,08	0,11	0,08	0,11	0,08	0,11	0,11	0,10	0,11	W6	0,09
K7	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	W7	0,04
K8	0,07	0,07	0,08	0,08	0,11	0,08	0,11	0,08	0,11	0,11	0,10	0,11	W8	0,09
K9	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	W9	0,04
K10	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	W10	0,04
K11	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	W11	0,02
K12	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	W12	0,04
Suma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	Suma	1,00

Źródło: obliczenia własne.

W badaniach problemu decyzyjnego metodą AHP ważna jest spójność ocen kryteriów, tożsama z przechodnością wag kryteriów. Aby oceny ważności kryteriów można było uznać za spójne, wartość wyliczanego wskaźnika zgodności nie powinna być większa od 0,1:

$$CR \leq 0,1. \quad (5)$$

Wskaźnik zgodności wyznaczany jest ze wzoru:

$$CR = \frac{CI}{R}, \quad (6)$$

gdzie:

CR – wskaźnik zgodności,

CI – współczynnik rozbieżności,

R – współczynnik losowych zgodności.

Współczynnik rozbieżności CI wyznaczany jest ze wzoru:

$$CI = \frac{n - \lambda_{max}}{n - 1}, \quad (7)$$

gdzie:

n – liczba kryteriów (wierszy macierzy),

λ_{max} – maksymalna wartość własna macierzy ocen.

Największa wartość własna macierzy, czyli tzw. współczynnik spójności, jest miarą zgodności porównań i jest wyznaczana za pomocą wzoru:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (8)$$

gdzie:

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n A_{ij} w_j}{w_i}. \quad (9)$$

Wartości współczynników spójności zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5

Współczynniki spójności ocen

Kryteria	A*W	w_i	λ_i	λ_{max}
K1	2,60	0,21	12,43	12,22
K2	2,60	0,21	12,43	
K3	1,16	0,09	12,29	
K4	1,16	0,09	12,29	
K5	0,45	0,04	12,10	
K6	1,16	0,09	12,29	
K7	0,45	0,04	12,10	
K8	1,16	0,09	12,29	
K9	0,45	0,04	12,10	
K10	0,45	0,04	12,10	
K11	0,21	0,02	12,15	
K12	0,45	0,04	12,10	
		Suma	146,65	

Źródło: obliczenia własne.

Ze wzoru (8) wyznaczono $\lambda_{max} = 12,22$.

Wyznaczony ze wzoru (7) $CI = 0,020$.

Współczynnik losowych zgodności R dobierany jest z tabeli 6. Dla macierzy 12×12 przyjęto $R = 1,54$. CR wyznaczony z (6) wynosi 0,013. Warunek spójności określony zależnością (5) jest spełniony.

Tabela 6

Współczynniki losowych zgodności

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54

Źródło: Thomas L. Saaty, *Mathematical Principles of Decision Making: The Complete Theory of the Analytic Hierarchy Process*, RWS Publications, Pittsburgh 1994, s. 56.

Kolejnym krokiem jest ranking wariantów według kryteriów, który polega na ocenie wszystkich programów w odniesieniu do danego kryterium i porównaniu ich między sobą (por. tab. 7).

Tabela 7

Macierz preferencji dla kryterium K1 – „Tworzenie i testowanie modelu”

Programy						
	Oceny	AnyLogic	Ascape	NetLogo	Repast	StarLogo TNG
		4	4	2	3	2
AnyLogic	4	1,00	1,00	5,00	3,00	5,00
Ascape	4	1,00	1,00	5,00	3,00	5,00
NetLogo	2	0,20	0,20	1,00	0,33	1,00
Repast	3	0,33	0,33	3,00	1,00	3,00
StarLogo TNG	2	0,20	0,20	1,00	0,33	1,00
Suma		2,73	2,73	15,00	7,67	15,00

Źródło: obliczenia własne.

Po przeprowadzeniu rankingu wariantów wykonywane jest kolejne normowanie według wzoru:

$$d_{ij} = \frac{c_{ij}}{k_j}, \quad (10)$$

gdzie:

c_{ij} – wartości oceny programu,

d_{ij} – suma wartości ocen w danej kolumnie,

k_j – suma ważności kryteriów z macierzy preferencji.

W kolejnym kroku oblicza się wektor sum częściowych:

$$s_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (11)$$

oraz wagi kryteriów:

$$wk_i = \frac{s_i}{n}, \quad (12)$$

gdzie:

$i = 1, \dots, n$.

Znormalizowaną macierz preferencji i wektor priorytetów dla K1 przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8

Znormalizowana macierz preferencji i wektor priorytetów dla kryterium K1 – „Tworzenie i testowanie modelu”

Programy	Oceny	AnyLogic	Ascape	NetLogo	Repast	StarLogo TNG	Waga (wk_i)	
		AnyLogic	4	0,37	0,37	0,33	0,39	0,33
Ascape	4	0,37	0,37	0,33	0,39	0,33	W2	0,358
NetLogo	2	0,07	0,07	0,07	0,04	0,07	W3	0,065
Repast	3	0,12	0,12	0,20	0,13	0,20	W4	0,155
StarLogo TNG	2	0,07	0,07	0,07	0,04	0,07	W5	0,065
Suma		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	Suma	1,000

Źródło: obliczenia własne.

W kolejnym kroku przeprowadzono eliminację niespójności. Wartości współczynników spójności zestawiono w tabeli 9.

Tabela 9

Współczynniki spójności ocen dla kryterium K1 – „Tworzenie i testowanie modelu”

Programy	A*W	wk_i	λ_i	λ_{max}
AnyLogic	1,83	0,36	5,10	5,06
Ascape	1,83	0,36	5,10	
NetLogo	0,32	0,06	5,01	
Repast	0,78	0,15	5,04	
StarLogo TNG	0,32	0,06	5,01	
Suma			25,28	

Źródło: obliczenia własne.

Współczynnik rozbieżności CI obliczono na podstawie wzoru 7 i wyniósł on 0,015. Posłużył on następnie do wyznaczenia (w oparciu o wzór 6 i wartość R odczytaną z tabeli 5) wskaźnika zgodności CR, który równa się 0,013. Wartość CR jest w związku z tym mniejsza lub równa 0,1, co pozwala na uznanie, że oceny są zgodne. W przeciwnym razie należałoby powtórzyć analizę ocen.

Powyższe kroki powtórzono w omawianych badaniach dla wszystkich 12 kryteriów. We wszystkich przypadkach wartość wskaźnika była mniejsza niż 0,1.

Ostatnim etapem metody AHP jest ostateczna ocena oprogramowania. Wartość rangi przyporządkowana odpowiedniemu wariantowi według danego kryterium jest równa iloczynowi wagi danego kryterium oraz ocenie danego wariantu według danego kryterium. Wyniki oceny programów zestawiono w tabeli 10.

Tabela 10

Zestawienie końcowe i ranking programów

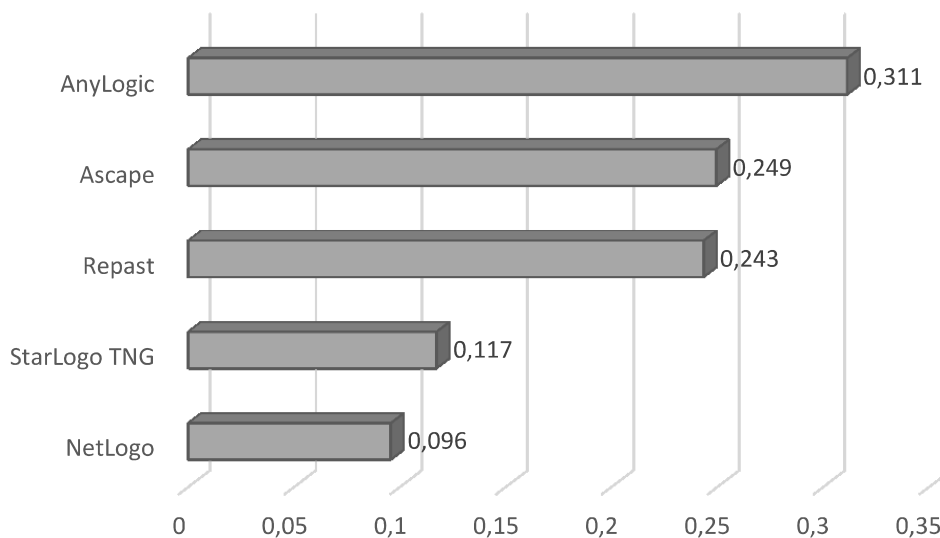
Kryteria Programy	K1	K2	K3	K4	K5	K6	...	K12	Suma	Ranking
AnyLogic	0,075	0,043	0,021	0,050	0,014	0,042	...	0,019	0,311	1
Ascape	0,075	0,043	0,021	0,012	0,014	0,018	...	0,008	0,249	2
NetLogo	0,014	0,020	0,007	0,005	0,003	0,007	...	0,004	0,096	5
Repast	0,033	0,097	0,021	0,012	0,005	0,018	...	0,008	0,243	3
StarLogo TNG	0,014	0,007	0,021	0,012	0,005	0,007	...	0,002	0,117	4

Źródło: obliczenia własne.

Podsumowanie

W ostatnich kilkunastu latach pojawiło się na rynku wiele programów wspomagających symulację wieloagentową. Wybór odpowiedniego oprogramowania jest zadaniem trudnym i zależy od rodzaju prowadzonych badań w danej dziedzinie. Niektórych dostępnych pakietów symulacyjnych można użyć do modelowania systemów o zróżnicowanym poziomie szczegółowości. Problem tego typu modelowania jest ściśle uzależniony od metodologii samego

modelowania. Modelowanie systemów o zmiennym poziomie szczegółowości zależy także od sposobu klasyfikacji danych do modelowania¹⁸. W artykule podjęto próbę wyboru najlepszego programu służącego do symulacji wieloagentowej spośród pięciu pakietów symulacyjnych należących do najpopularniejszych. Analiza została przeprowadzona według określonych kryteriów z zastosowaniem metody wielokryterialnej AHP – *Analytic Hierarchy Process*. Metoda AHP pozwoliła na sformułowanie wniosku, że najlepszym programem do symulacji wieloagentowej jest system AnyLogic (por. wyniki oceny programów w postaci graficznej pokazane na rys. 1). Pomimo faktu, że jest to aplikacja komercyjna droga (pozostałe programy były dostępne bezpłatnie), na podstawie przyjętych kryteriów wypada ona najlepiej spośród analizowanych programów. Drugą opcją wartą rozważenia jest program Ascape. Zdecydowanie najgorzej wypadł w rankingu program NetLogo.



Rys. 1. Poziom znormalizowanej oceny końcowej wybranych programów do symulacji wieloagentowej

Źródło: opracowanie własne.

¹⁸ R. Zdanowicz, *op. cit.*, s. 17.

Zaprezentowana w artykule metoda pozwala na wybór najlepszego oprogramowania do modelowania i symulacji wieloagentowej. Metody wielokryterialnego podejmowania decyzji, w tym AHP, przekładają zależności i mechanizmy sformułowane w sposób teoretyczny na konkretne rozwiązania poparte obliczeniami. Metodę AHP można stosować do podejmowania decyzji w wielu innych dziedzinach.

Literatura

- Adamus W., Łasak P., *Zastosowanie metody AHP do wyboru umiejscowienia nadzoru nad rynkiem finansowym*, „Bank i Kredyt” 2010, nr 41 (4).
- AnyLogic, <http://www.anylogic.com>.
- Ascape, <http://ascape.sourceforge.net>.
- Bieniasz S., *Techniki symulacji agentowej w zastosowaniu do badania procesów cieplnych*, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH, Kraków 2006, <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy/9711/full9711.pdf>.
- Curtis, B., Kellner, M., Over, J., *Process Modeling*, „Communications of the ACM” 1992, No. 35 (9).
- Downarowicz O., Krause J., Sikorski M., Stachowski W., *Zastosowanie metody AHP do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego*, w: *Wybrane metody ergonomii i nauki o eksploatacji*, red. O. Downarowicz, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2000.
- Łatuszyńska M., Wawrzyniak A., Wąsikowska B., Furaji F., *Zastosowanie zbiorów przybliżonych do wykrywania reguł zachowania konsumentów na potrzeby wieloagentowego modelu symulacyjnego*, w: *Uwarunkowania zastosowań systemów informatycznych w gospodarce*, red. W. Chmielarz, Problemy Zarządzania Vol. 10, No. 3 (38), Wydawnictwo Naukowe Wydziału Zarządzania UW, Warszawa 2012.
- Macal Ch.M., North M.J., *Tutorial on agent-based modeling and simulation*, Part 2. *How to model with agent*, w: *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, red. L. F. Perrone i in., WSC 2006, Monterey 2006, <http://www.informs-sim.org/wsc06papers/008.pdf>.
- Maciąg A., Pietroń R., Kukła S., *Prognozowanie i symulacja w przedsiębiorstwie*, PWE, Warszawa 2013.
- NetLogo, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.
- Repast, <http://repast.sourceforge.net>.
- Saaty T.L., *Decision making with the analytic hierarchy proces*, „International Journal of Services Sciences” 2008, Vol. 1, No. 1.

- Saaty T.L., *Decision-Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decision in a Complex World. New Edition. Analytic Hierarchy Process Series, Vol. 2*, RWS Publications, Pittsburgh 2001.
- Saaty T.L., *How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process*, „European Journal of Operational Research” 1990, nr 48.
- Saaty T.L., *Mathematical Principles of Decision Making: The Complete Theory of the Analytic Hierarchy Process*, RWS Publications, Pittsburgh 1994.
- Salamon T., *Design of Agent-Based Models. Developing Computer Simulations for a Better Understanding of Social Processes*, Eva & Tomas Bruckner Publishing, Repin-Zivonin 2011.
- Siebers P.O., Aickelin U., *Introduction to multi-agent simulation*, w: *Encyclopedia of Decision Making and Decision Support Technologies*, red. F. Adam, P. Humphreys, Idea Group Publishing, Pennsylvania 2008.
- StarLogo TNG, <http://education.mit.edu/projects/starlogo-tng>.
- Wooldridge M., Jennings N.R., *Intelligent agents: Theory and practice*, „The Knowledge Engineering Review” 1995, No. 10 (2).
- Zdanowicz R., *Dobór oprogramowania do modelowania i symulacji procesów wytwarzania*, „Pomiary, Automatyka i Robotyka” 2006, nr 1.

EVALUATION AND SELECTION OF MULTI-AGENT SIMULATION SOFTWARE WITH AHP METHOD

Summary

The growing demand for simulation programs causes their constant development which results in the increasing diversity of the software and greater number of simulation systems available on the market. This is a very positive phenomenon, but on the other hand it sets before the user a difficult task to choose a proper software for their needs. In the article results of the practical application of the analytic hierarchy process (AHP) for taking decision concerning choice of the best software for the multi-agent based simulation (MABS) were presented. The aim of the article is the comparative analysis of selected tools based on the AHP method. The article draws the comparison between five popular tools and thanks to it the best program from a point of view of adopted evaluation criteria was chosen.

Translated by Agata Wawrzyniak