

**Arkadiusz NETCZUK, Tadeusz NOWICKI,
Dariusz PIERZCHAŁA**

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
E-mail: arkadiusz.netczuk@wat.edu.pl, tadeusz.nowicki@wat.edu.pl,
dariusz.pierzchala@wat.edu.pl

Wieloagentowy model symulacyjny rozprzestrzeniania się epidemii

1 Wstęp

Wśród wielu metod symulacyjnego badania obiektów i systemów w ostatnich latach popularność i uznanie zdobyły wieloagentowe modele symulacyjne, w których stosuje się podejście zarówno *stricte* zdarzeniowe, jak też oparte na aktywnościach obiektów [4, 9, 11]. Agentą programowego [1, 5] można traktować jako encję o istotnych dla badań własnościach obiektu, rozszerzoną o cechy takie, jak: autonomiczność (zdolność podejmowania samodzielnych decyzji), komunikatywność (dialog z innymi agentami lub użytkownikiem), reaktywność (zdolność do reagowania na zmiany w otoczeniu) oraz percepcja (zdolność do postrzegania i rozumienia otoczenia). Agenty mogą modelować każdy wyróżniony byt, zarówno materialny (osobowy lub bezosobowy), jak i niematerialny (konceptualny). Reprezentują przy tym różne poziomy postrzegania i inteligencji: od pasywnych i bezregulowych, przez aktywne/reaktywne, aż do kreatywnych i uczących się, które są w pełni autonomiczne lub współdziałają z innymi. W artykule skupiono się na symulacji agentowej [10] (ang. *Agent-based simulation*), czyli symulacji dynamicznej z wykorzystaniem obiektów wykazujących cechy agenta. Dla podkreślenia faktu współistnienia wielu komunikujących się i realizujących własne cele agentów wprowadzono określenie „symulacja wieloagentowa”.

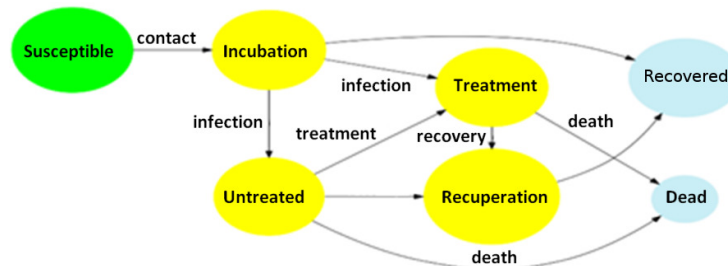
Rozważając możliwe wystąpienia agenta w złożonych systemach rzeczywistych, niezbędne może być uwzględnienie dynamicznych zmian stanu agenta, w sposób ciągły lub w dyskretnych chwilach, deterministyczne i stochastyczne oraz w mikro- lub makroskali [2]. Decyzją twórcy modelu pozostaje wybór właściwej programowej reprezentacji dynamiki agentów. Przedstawiony w artykule model symulacyjny jest wieloagentowym dyskretno-zdarzeniowym modelem rozprzestrzeniania się oraz przeciwdziałania epidemii [6, 7, 8]. Główną uwagę skupiono na populacji ludzi w ustalonym regionie, łańcuchu dystrybucji żywności oraz działaniu służb przeciwdziałania epidemii. Ponadto do modelu wprowadzono reprezentację terenu, bazującą na koncepcji automatu komórkowego [5]. Podstawowym elementem przestrzeni jest obszar, utożsamiany z komórką, do którego przypisano punkt geograficzny, powierzchnię oraz wielkość populacji. Podział symulowanej przestrzeni na obszary zależy od scenariusza i może przebiegać zgodnie z podziałem administracyjnym dzielnic miasta, układem krain geograficznych itp. Przestrzennemu rozmieszczeniu podlegają również punkty dystrybucji żywności [3, 12] (elementy

łańcucha dystrybucji żywności). W tym przypadku również każdy punkt przypisany jest do określonego obszaru.

2 Model stanu agenta

Podstawowym komponentem opisywanego modelu jest populacja, w której następuje szerzenie się epidemii. Osobnik przedstawiony został przy pomocy klasycznego w epidemiologii podejścia maszyny stanów, w której sednem jest prezentacja faz (stanów, etapów), przez jakie przechodzi osoba zarażona wraz z kolejnością, czasem trwania i prawdopodobieństwami przejść pomiędzy stanami (w przypadku gdy dany stan może powodować przejście do kilku różnych stanów, np. alternatywnie: skuteczne wyleczenie lub zgon pacjenta). Populacja, na bazie modeli *SIR*, ze względu na etap choroby została podzielona na następujące stany:

- podatny (ang. *Susceptible*) - osobnik zdrowy, podatny na zarażenie;
- wylęganie (ang. *Incubation*) - osobnik zarażony w stadium wylęgania choroby (stan bezobjawowy);
- nieleczony (ang. *Untreated*) - stan z występującymi objawami choroby bez podjętej hospitalizacji (możliwe leczenie w warunkach domowych);
- leczenie (ang. *Treatment*) - stan określający objęcie pacjenta opieką medyczną (hospitalizacja);
- rekonwalescencja (ang. *Recuperation*) - stan, w którym choroba przemija na skutek podjętych działań;
- wyleczony (ang. *Recovered*) - stan osobnika po skutecznie wyleczonej chorobie (utożsamiany z nabytą odpornością);
- nieżywy (ang. *Dead*) - stan osobnika określający nieskuteczne próby leczenia.



Rys. 1. Stany pojedynczego osobnika symulowanej populacji

Fig. 1. States of an agent within population under simulation

Przejścia pomiędzy wymienionymi stanami zostały przedstawione na rysunku 1. Kolorem zielonym (pierwszy z lewej strony) został wyróżniony stan początkowy (*Susceptible*), kolorem żółtym (środkowe) wyróżniono stany pośrednie (*Incubation*, *Untreated*, *Treatment*, *Recuperation*), zaś kolorem niebieskim (prawa strona) stany końcowe (*Recovered*, *Dead*) rozwoju choroby. Należy zwrócić uwagę, że ten sam agent nie może osiągnąć jednocześnie dwóch stanów końcowych.

Specyfika epidemii, w których nośnikiem patogenu jest pokarm, w istotny sposób determinuje zachowanie agentów. Podstawowym zachowaniem agenta (w stanie *Susceptible*) jest nabywanie i spożywanie żywności - wówczas następuje potencjalne przeniknięcie patogenu do agenta (przejście do stanu *Incubation*). Gdy agent jest pod wpływem patogenu, może wystąpić samoistne zwalczenie toksyny przez organizm agenta bądź rozwój choroby, na skutek której może nastąpić zgon. Przyjmuje się, że podczas trwania choroby oraz po jej ustąpieniu agent nie uczestniczy w procesie spożywania potencjalnie skażonej żywności. Stany *Recovered* oraz *Dead* są stanami końcowymi, natomiast stan *Susceptible* jest stanem stabilnym - przejście następuje po kontakcie z patogenem.

Niech S będzie zbiorem wymienionych powyżej stanów choroby:

$$\mathbb{S} = \{\text{Sus, Inc, Unt, Tre, Rep, Rev, Dea}\}. \quad (1)$$

Wówczas stan agenta ulega zmianie zgodnie z funkcją:

$$\begin{aligned} \phi: \mathbb{S} \times \mathbb{S} &\rightarrow [0,1], \text{ taką że} & (2) \\ \phi(x, y) &= \begin{cases} f_{\text{Sus}}(p, c) & (x, y) = (\text{Sus, Inc}) \\ \frac{\beta_p}{z} & (x, y) = (\text{Inc, Unt}) \\ \frac{\beta_p}{z} & (x, y) = (\text{Inc, Tre}) \\ 1 - \beta_p & (x, y) = (\text{Inc, Rev}) \\ 1 - \lambda & (x, y) = (\text{Unt, Tre}) \\ f_{\text{Unt}}(p, \lambda) & (x, y) = (\text{Unt, Dea}) \\ 1 - f_{\text{Unt}}(p, \lambda) & (x, y) = (\text{Unt, Rep}) \\ f_{\text{Tre}}(p, \lambda) & (x, y) = (\text{Tre, Dea}) \\ 1 - f_{\text{Tre}}(p, \lambda) & (x, y) = (\text{Tre, Rep}) \\ 1 & (x, y) = (\text{Rep, Rev}) \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases}, & (3) \end{aligned}$$

gdzie:

$f_{\text{Sus}}(p, c) \rightarrow [0,1]$ - jest funkcją intensywności zarażenia patogenem zależną od zjadliwości patogenu p zawartego w porcji c spożytego produktu,

$\beta_p \in [0,1]$ - jest prawdopodobieństwem rozwoju zakażenia wywołanego patogenem p ,

$\lambda \in [0,1]$ - jest stopniem zaawansowania choroby,

$f_{\text{Unt}}(p, \lambda) \rightarrow [0,1]$ - jest funkcją intensywności zgonu w przypadku nieleczzonej choroby zależną od patogenu p oraz stopnia λ ,

$f_{\text{Tre}}(p, \lambda) \rightarrow [0,1]$ - jest funkcją intensywności zgonu w przypadku leczonej choroby zależną od patogenu p oraz stopnia λ .

Czasy trwania stanów przejściowych *Incubation*, *Untreated*, *Treatment*, *Recuperation* opisane są następująco:

$$\begin{aligned} T_{\text{Inc}} &= \theta_{\text{Inc}}(p) \\ T_{\text{Unt}} &= \lambda \cdot \theta_{\text{Inf}}(p) \\ T_{\text{Tre}} &= (1 - \lambda) \cdot \theta_{\text{Inf}}(p) \\ T_{\text{Rep}} &= R \end{aligned} \quad , \quad (4)$$

gdzie:

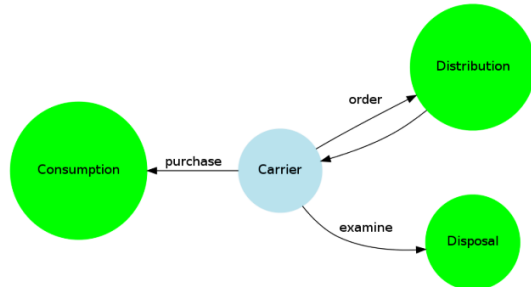
$\theta_{\text{Inc}}(p)$ - jest funkcją czasu trwania stanu *Incubation* wywołanego patogenem p ,

$\theta_{\text{Inf}}(p)$ - jest funkcją czasu trwania choroby wywołanej patogenem p .

W modelu przyjmuje się, że jednostką czasu jest godzina, niemniej wielkość czasu pomiędzy dowolnymi dwoma zdarzeniami może być znacznie mniejsza. Stopień λ zaawansowania choroby jest określony jako stosunek czasu trwania stanu „nieleczony” do czasu stanu „leczenie”. W modelu przyjęto, iż czas trwania stanu rekonwalescencja jest stały i wynosi R .

3 Nośnik

Nośnik można zakwalifikować jako tzw. agenta pasywnego. Agent tego typu nie posiada własnej autonomii działania, lecz w istotny sposób pośredniczy w przebiegu symulowanych procesów. W modelu wyróżniono następujące rodzaje nośników - produktów: pochodzenia roślinnego, zwierzęce oraz wodę. Rozważamy dystrybucję wyłącznie poprzez łańcuch dostaw, z określoną umownie jednostką, którą jest typowa miara występująca w dystrybucji detalicznej (np. sztuki, opakowania, butelki, kilogramy itp.). A ze względu na charakter nośników, sposób przechowywania oraz dynamikę dystrybucji produktów spożywczych przyjęto, że produkty nie ulegają przeterminowaniu. Do każdego produktu przypisane są następujące atrybuty: nazwa, minimalna wielkość sprzedaży detalicznej, dzienne średnie zapotrzebowanie oraz rodzaj. Nośnik opisany jest trzema atrybutami: produktem (którego dotyczy), wielkością przenoszonego produktu, zawartym patogenem. Dynamika dystrybucji nośnika określona jest na podstawie minimalnej wielkości sprzedaży oraz dziennego zapotrzebowania. Nośnik może być objęty jednym z trzech, przedstawionych na rysunku 2, działań: *konsumpcją*, *dystrybucją* oraz *utilizacją*.



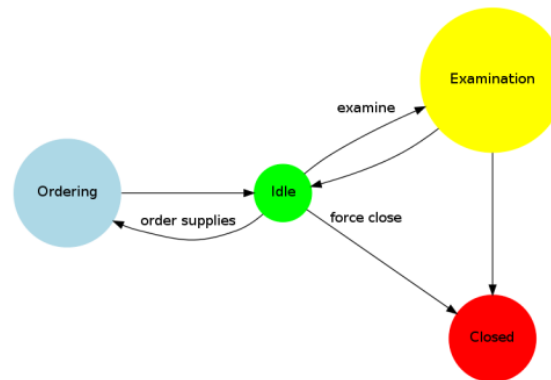
Rys. 2. Stany nośnika patogenu

Fig. 2. States of pathogen's carrier

Konsumpcja prowadzi do ekspozycji osobnika na działanie patogenu - wówczas może dojść do zakażenia. Poprzez dystrybucję nośnik jest propagowany w łańcuchu dostaw, natomiast utylizacja eliminuje nośnik z obiegu (realizowane przez odpowiednie służby).

4 Łańcuch dystrybucji

Przedstawiony w modelu łańcuch dystrybucji jest typowym czterostopniowym łańcuchem składającym się z następujących elementów: producent (ang. *manufacturer*), hurtownik (ang. *wholesaler*), detalista (ang. *retailer*) oraz konsument (ang. *consumer*). Łańcuchy tego typu zostały przedstawione między innymi w [6] oraz [7]. Sieć dystrybucji przybiera postać skierowanego grafu acyklicznego, w którym występują następujące rodzaje wierzchołków, dalej zwanych punktami dystrybucji: hurtowej (*Wholesale*), detalicznej (*Retail*) oraz punkty żywienia (*ConsumptionPoint*). Podstawową czynnością punktu dystrybucji jest zamawianie oraz realizacja zamówień towarów. Każdy punkt dystrybucji składa zamówienia w stałych odstępach czasowych. Popyt na produkty jest stymulowany przez populację i propagowany w górę drzewa dystrybucji. Dodatkowo każdy punkt może być czasowo lub stale zamknięty na skutek przeprowadzanej inspekcji lub wykrycia skażenia. Stany punktów dystrybucji przedstawiono na rysunku 3, natomiast funkcję przejścia pomiędzy stanami w tabeli 1.



Rys. 3. Stany punktu dystrybucji

Fig. 3. States of distribution point

Przyjmujemy następujące oznaczenia:

- C - magazynowana skażona żywność,
- t_s - czas wejścia do aktualnego stanu,
- T_0 - okres pomiędzy zamówieniami.

Tabela 1. Funkcja przejść stanów punktu dla dystrybucji

Table 1. State changes function for distribution point

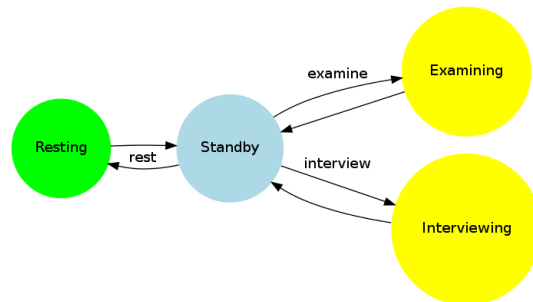
Aktualny stan	Warunek	Nowy stan
Oczekiwanie	$t > t_s + T_0$	Dostawa
Dostawa	-	Oczekiwanie
Oczekiwanie	akcja inspektora	Kontrola
Kontrola	$\ C\ = 0$	Oczekiwanie
Kontrola	$\ C\ > 0$	Zamknięte
Oczekiwanie	akcja inspektora	Zamknięte

5 Służby sanitarno-epidemiologiczne

Główne przeciwdziałania epidemii prowadzą służby sanitarno-epidemiologiczne. Podstawową jednostką służb jest Powiatowa Stacja Sanitarno-Epidemiologiczna działająca w obrębie powiatu. Działalność służb sanitarno-epidemiologicznych skupia się w dwóch zadaniach, których celem jest dążenie do wcześniejszego zahamowania wzrostu zachorowalności, a w konsekwencji także ograniczenia liczby zgonów w populacji:

- realizacja inspekcji punktów dystrybucji pod kątem występowania patogenów chorobotwórczych;
- zbieranie i przetwarzanie wywiadów z osobami zarażonymi, których celem jest uzyskanie informacji o punktach, gdzie potencjalnie występuje patogen.

Wspomniane działania zostały zamodelowane jako aktywności inspektorów. Podstawowym parametrem jest średni czas potrzebny na realizację poszczególnego działania przy ograniczeniu inspektora do wykonywania jednocześnie tylko jednego zadania. Zadania inspektora, wraz z wyróżnionymi przejściami, zostały przedstawione na rysunku 4. Wprowadzono dodatkowo stan odpoczynku (ang. *Resting*) oraz oczekiwania na zadanie (ang. *Standby*). Stany te związane są z możliwością występowania braku zadań oczekujących na realizację oraz ograniczeń fizycznych przeciwko pracy ciągłej.



Rys. 4. Stany inspektora

Fig. 4. States of inspector

Inspektorzy specjalizują się w danym typie działania, w związku z czym przyjmuje się, że każdy inspektor realizuje tylko jeden wybrany typ działania.

Przyjmujemy następujące oznaczenia:

Q_E – kolejka punktów dystrybucji do przeprowadzania kontroli,

Q_I – kolejka osobników do przeprowadzania wywiadu,

t_S – czas wejścia do aktualnego stanu,

t_R – czas ostatniego wejścia do stanu *Resting*,

T_E – długość trwania inspekcji punktu dystrybucji,

T_I – długość trwania wywiadu,

T_R – długość trwania odpoczynku,

T_W – długość trwania dnia pracy.

Tabela 2. Funkcja zmiany stanu inspektora

Table 2. State changes function of inspector

Aktualny stan	Warunek	Nowy stan
Oczekiwanie	$\ Q_E \ > 0$	Badanie
Badanie	$t > t_S + T_E$	Oczekiwanie
Oczekiwanie	$\ Q_I \ > 0$	Wywiad
Wywiad	$t > t_S + T_I$	Oczekiwanie
Oczekiwanie	$t > t_R + T_W$	Odpoczynek
Odpoczynek	$t > t_S + T_R$	Oczekiwanie

W powyższej tabeli przedstawiono funkcję zmiany stanu inspektora. Funkcja ta zależy głównie od czasu trwania poszczególnych czynności oraz od kolejki zadań do zrealizowania. W związku z przyjętym założeniem o specjalizacji inspektorów, każdy z inspektorów traktuje wybraną kolejkę priorytetowo. Wynikiem przeprowadzenia inspekcji punktu dystrybucyjnego jest potwierdzenie bądź zaprzeczenie występowania patogenu w badanym punkcie. Ze względu na wydajne techniki badawcze wykluczono możliwość błędnej diagnozy. Wynikiem prowadzonego wywiadu z chorym jest zbiór punktów dystrybucji wytypowanych jako potencjalne miejsca, w których mogło dojść do spożycia skażonej żywności. Wynik ten jest obciążony błędem między innymi ze względu na czas inkubacji choroby, częstotliwość spożywania oraz nawyki żywieniowe pacjenta. Zbiór określony jest na podstawie prawdopodobieństwa wskazania punktu dystrybucyjnego, w którym doszło do spożycia patogenu, a w konsekwencji do choroby.

6 Komponent symulacji dyskretno-zdarzeniowej

Jeżeli przyjmujemy, że opis agenta agreguje wektor stanu agenta (ang. *belief about itself*), wektor wiedzy o otoczeniu (ang. *belief about environment*) oraz innych agentach (ang. *belief about agents*), model komunikacji, reguły reagowania na bodźce zewnętrzne, a także reguły zachowania własnego (myślenie i planowanie działań), to ostatnie trzy składowe reprezentują dynamikę zmian stanu agenta. Dla dyskretnych modeli opartych na zdarzeniach istotę podejścia wyrażają następujące założenia:

- dynamikę obiektu, agenta i systemu modeluje ciąg zmian stanów planowanych na określony czas lub poprzez semaforów warunkowe;

- w wyniku realizacji zdarzeń funkcje zmiany stanu w zdarzeniach przenoszą obiekt, agenta i system do nowego stanu.

Praktyczną realizacją w języku Java komponentu symulacji dyskretnej zdarzeniowej jest pakiet *DisSimLab*, zaimplementowany z wykorzystaniem popularnych bibliotek odpowiedzialnych za przesyłanie komunikatów (*GuavaEventBus*), za dynamiczne konfigurowanie obiektów (*XMLDecoder*) oraz persystencję obiektów (*XStream*). Klasy pogrupowane zostały w następujące główne pakiety:

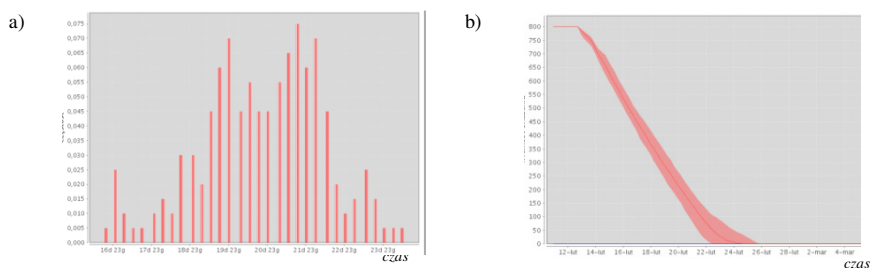
- *simcore* – pakiet grupujący klasy odpowiedzialne za zarządzanie eksperymentem, upływ czasu symulacyjnego, zdarzenia i zmiany stanu;
- *broker* – klasy umożliwiające przesyłanie komunikatów pomiędzy obiektami symulacyjnymi (agentami, środowiskiem);
- *random* – pakiet klas generatora liczb pseudolosowych;
- *monitors* – klasy odpowiedzialne za monitorowanie, gromadzenie i udostępnienie do analizy statystycznej szeregów czasowych pochodzących ze wskazanych zmiennych programowych.

Każdy obiekt symulacyjny, będący przodkiem programowym agenta, musi dziedziczyć z abstrakcyjnej klasy *BasicSimObject*. W jego zestawie atrybutów przechowywane są przede wszystkim wartości zmiennych stanu opisujące własne cechy, postrzeganie innych obiektów oraz środowiska (niekoniecznie zgodne z danymi w tychże postrzeganych obiektach). Zdarzenia przypisane do obiektów *BasicSimObject*, skojarzone ze zmianami stanu jednego lub wielu agentów i środowiska, powstają w obiektach klas dziedziczących z generycznej klasy *BasicSimEvent*. Główne metody tej klasy to: *stateChange()* – realizująca zmiany stanu, *onTermination()* – usuwająca zdarzenie przed realizacją, *reschedule()* – przeplanowująca zdarzenie na inny czas. Atrybutami w *BasicSimEvent* są parametry sterujące: planowany czas i priorytet wykonania zmiany stanu (*runSimTime*, *priority*) oraz opcjonalny krok czasowy (*repetitionPeriod*) dla modelu deterministycznego ze stałym krokiem. W zależności od użytego konstruktora powoływany jest obiekt zdarzenia jednego z rodzajów: dla zmiany stanu zaplanowanej do kalendarza (*SimEventCalendar*) na chwilę *runSimTime* lub zaplanowanej warunkowo na semaforze *SimEventSemaphore*. Struktura kalendarza zdarzeń, uporządkowanych według wartości *runSimTime* i *priority*, wkomponowana jest w obiekt kontekstu (*simContext*).

7 Podsumowanie

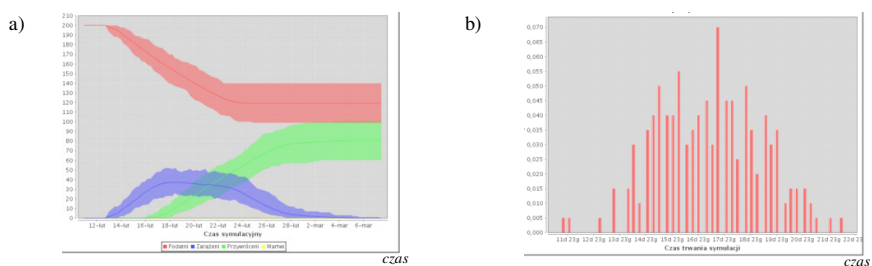
Działanie opisanego modelu zostało przedstawione na przykładzie dwóch eksperymentów symulacyjnych. Każdy z nich składa się z prostego łańcucha dystrybucji złożonego z pojedynczego hurtownika, pojedynczego punktu dystrybucji detalicznej oraz dwóch punktów żywienia. Populacja początkowa wynosi 800 osób, natomiast wielkość skażenia 800 jednostek. Każdy z eksperymentów realizuje 200 powtórzeń symulacji. Pierwszy eksperyment polega na symulacji swobodnej dystrybucji, bez ingerencji służb sanitarno-epidemiologicznych, natomiast drugi z udziałem wspomnianych służb.

Wieloagentowy model symulacyjny rozprzestrzeniania się epidemii

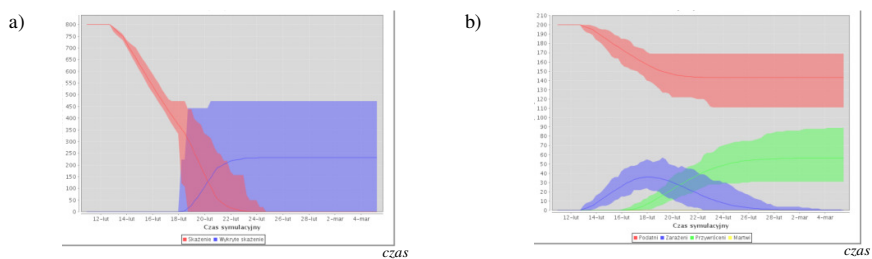


Rys. 5. Eksperyment 1: a) histogram czasu epidemii; b) wielkość skażonej żywności
 Fig. 5. Experiment 1: a) histogram of epidemic duration; b) size of contaminated food

Na rysunkach 5 oraz 6 zobrazowano wyniki pierwszego eksperymentu, natomiast na rysunku 7 zostały zaprezentowane wyniki eksperymentu nr 2. Wykresy histogramów czasu trwania epidemii obu eksperymentów są podobne – prezentują rozkład czasu zbliżony do krzywej gaussowskiej.



Rys. 6. Eksperyment 1: a) populacja stanów SIRD; b) histogram trwania epidemii
 Fig. 6. Experiment 1: a) population of SIRD states b) histogram of epidemic duration



Rys. 7. Eksperyment 2: a) wielkość skażonej żywności; b) populacja stanów SIRD
 Fig. 7. Experiment 2: a) size of contaminated food; b) population of SIRD states

Wykresy dystrybucji skażenia podczas pierwszych 8-miu symulowanych dni są podobne, natomiast w kolejnych dniach można dostrzec wyraźną różnicę, wynikającą z działania służb sanitarnych. Wykres dla drugiego eksperymentu prezentuje gwałtowny

spadek wielkości dystrybuowanej masy skażenia oraz wzrost wielkości wykrytego skażenia. Okres początkowych 8 dni nie jest przypadkowy i składa się z 2 dni dystrybucji skażenia, od hurtownika do punktu żywienia, około 3-4 dni okresu wylęgania choroby oraz około 2 dni potrzebnych na realizację inspekcji punktu dystrybucji.

Efekty działania służb epidemiologicznych dostrzegalne są również na wykresach populacji stanów choroby. W pierwszym eksperymencie średnia liczba osób narażonych na działanie patogenu wynosi około 80, natomiast w drugim około 57. Dodatkowo inny przebieg mają krzywe stanu „Zarażeni”. W pierwszym przypadku występuje charakterystyczny okres stabilizacji liczby osobników zarażonych, związany ze stałym przyrostem nowych wystąpień choroby oraz stałym przyrostem osób, które przebyły chorobę. W drugim eksperymencie początek okresu stabilizacji pokrywa się z wykryciem pierwszych ognisk, a co za tym idzie z redukcją skażenia w łańcuchu dostaw, a w konsekwencji ze zmniejszeniem się liczby nowych zachorowań.

Podsumowując, poprzez eksperymenty w skonstruowanym środowisku symulatora wieloagentowego rozwoju epidemii można było wyróżnić następujące cechy epidemii rozprzestrzeniających się drogą pokarmową: zmianę w czasie liczby chorych (w różnych stadiach) i wyleczonych zgodną z klasycznymi modelami SIR, monotoniczną w czasie zmianę wielkości skażonej żywności, charakter spadku liczby nowych zachorowań na skutek eliminacji skażonej żywności w łańcuchu dostaw (systemie dystrybucji), a także wygaśnięcie epidemii w wyniku eliminacji skażonej żywności itp.

Literatura

1. Anderson J. A., Head T. J.: *Automata theory with modern applications*. Cambridge University Press, 2006
2. Bar-Yam Y.: *Dynamics of Complex Systems*. Addison Wesley, 2003
3. Chang Y., Makatsoris H.: Supply chain modeling using simulation. *International Journal of simulation* 2(1), 2002
4. Fishman G. S.: *Discrete-Event Simulation. Modeling, Programming, and Analysis*. Springer, 2001
5. Von Neumann J.: *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Champaign, IL, USA 1966
6. Kermack W. O., McKendrick A. G.: A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 115:700-721, 1927
7. Murray J. D.: *Mathematical Biology. I: An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
8. Murray J.D.: *Mathematical Biology. II: Spatial Models and Biomedical Applications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2003
9. Perros H.: *Computer Simulation Techniques. The definitive introduction*. North Carolina State University, 2009
10. Pierzchała, D., Szymański, P.: Ontology-based adapter for data of multi-resolution battlefield simulation. *XVIII Workshop of the Polish Computer Simulation Society*, Poland, 2011
11. Ross S. M.: *Simulation*. Elsevier, 2006

12. Vieira G. E.: Ideas for modeling and simulation of supply chains with arena.
Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference 2:141--1427, 2004

Streszczenie

W pracy przedstawiono wieloagentowy symulator programowy rozwoju epidemii chorób przenoszonych drogą pokarmową. Jest to dyskretno-zdarzeniowy model rozprzestrzeniania się oraz przeciwdziałania epidemii. Główną uwagę skupiono na analizie rozpatrywanej populacji ludzi w ustalonym regionie, łańcuchu dystrybucji żywności oraz działaniu służb przeciwdziałania epidemii. Pokazano sposób uzyskiwania podstawowych charakterystyk epidemii. Przeanalizowano własności symulatora wieloagentowego.

Słowa kluczowe: epidemia chorób przenoszonych drogą pokarmową, symulator epidemii, badanie własności procesów epidemii, symulacja wieloagentowa

Multiagent simulation model of epidemy spread

Summary

The paper presents multiagent software simulator connected with food-borne diseases epidemy. It is adiscrete-event model of epidemy spread with preventive activities. The main attentions focused on the analysis of given human population in a fixed region, the chain of food distribution and preventive activities. It shows how to obtain characteristics of the epidemy. Properties of multi-agent simulator are obtained and analyzed.

Keywords: food-borne diseases epidemy, epidemy simulator, study of properties of epidemy processes, multi-agent simulation