

Anna Latawiec

Symulacja zjawisk biologicznych widziana systemowo

Studia Philosophiae Christianae 26/2, 37-53

1990

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

ANNA LATAWIEC

SYMULACJA ZJAWISK BIOLOGICZNYCH WIDZIANA SYSTEMOWO

1. Wprowadzenie, 2. Podstawy teorii systemów,, 3. Symulacja na tle teorii systemów, 4. Ilustracja systemowego ujęcia modelu symulacyjnego, 5. Zakończenie.

1. WPROWADZENIE

Teoria systemów¹ od swych początków budziła duże zainteresowanie. Podejmowano próby wplecenia jej w inne teorie. Widziano w niej nowy sposób interpretacji otaczającej nas rzeczywistości. Ostatnio podjęto także próbę sformalizowania ogólnej teorii systemów. U podstaw tego zabiegu znalazł się precyzyjnie sformułowany cel, oraz odpowiednio dobrany aparat pojęciowy. Szczególnie interesujące wydaje się ujęcie M. D. Mesarovica² i A. W. Wymore'a³. W celu opisanego zachowania się systemu Mesarović posłużył się dwiema metodami: za pomocą relacji wejście—wyjście określonej na iloczynnie kartezjańskim dwu rozłącznych rodzin zbiorów abstrakcyjnych (jest to ujęcie przyczynowe) oraz za pomocą wskazania celu, w którym powyższa relacja dwuargumentowa wyrażona została jako proces dążenia do celu (jest to ujęcie teleologiczne). Natomiast spleciona teoria systemów Wymore'a powiązała teorię automatów dyskretnych z teorią systemów ciągłych opisywanych przy pomocy równań różniczkowych. Autor określił własne pojęcie systemu, sformalizował określenie sprzężenia zwrotnego, zastosował pojęcie homomor-

¹ L. von Bertalanffy, *Problems of Life*, London 1952; tenże, *The theory of open systems in physics and biology*, Science 111 (1950) 23—29; tenże, *Teoria układu otwartego w biologii i fizyce*, w: *Filozoficzne zagadnienia biologii*, 1966, 122—138.

² M. D. Mesarović, *Matematyczna teoria systemów ogólnych*, w: *Ogólna teoria systemów*, pr. zb. red. G. J. Klira, Warszawa 1976, 246—262.

³ A. W. Wymore, *Spleciona teoria systemów*, w: *Ogólna teoria systemów*, dz. cyt., 263—292.

fizmu systemów dla formalizacji zasady modelowania i symulacji.

Powiązanie teorii systemów z innymi dziedzinami znajdujemy między innymi w przypadku teorii regulonów⁴, przy nowej próbie interpretacji teorii biosystemogenezy⁵, a także przy najnowszych próbach wyjaśniania zjawiska życia⁶. Okazuje się, iż analiza zachowania i funkcjonowania żywych organizmów w ich naturalnym, bądź sztucznym środowisku upoważnia do zastosowania teorii systemów również w badaniach zjawisk biologicznych. Jedną z bardziej istotnych cech zjawisk biologicznych jest ich ogromna złożoność i dynamika, co zasadniczo zwiększa możliwość wykorzystania symulacji — metody rozumianej także bardzo dynamicznie.

Przez zjawisko, najogólniej rozumie się to, co może być zarejestrowane przez świadomość, czyli to, co dane jest dzięki obserwacji i eksperymentowi. Zwykle zjawisko jawi się w formie procesu i wówczas rozumiane jest jako ciąg zmieniających się stanów jakiegoś układu. Zjawisko biologiczne, to zjawisko życiowe przebiegające na wszystkich poziomach organizacji życia w oparciu o informację biologiczną⁷.

W poniższych rozważaniach zostanie podjęta próba wskazania zależności zachodzących między teorią systemów a układami żywymi, oraz między teorią systemów a symulacją jako metodą badania procesów opartych na wymianie informacji; metodą służącą do poznawania tychże układów żywych. Na tle krótko zarysowanej teorii systemów zostanie przedstawiona propozycja systemowego widzenia symulacji oraz model symulacyjny rodziny pszczelej.

2. PODSTAWY TEORII SYSTEMÓW

Myślenie systemowe charakteryzuje się tym, że jednocześnie brana jest pod uwagę całość i jej elementy wraz z ich otoczeniem, przy równoczesnym uwzględnieniu dynamicznego aspektu badanych obiektów.

⁴ M. Lubański, *Regulony i systemy*, *Studia Philosophiae Christianae* 21 (1985) 2, 25—37.

⁵ Sz. W. Słaga, *U podstaw biosystemogenezy*, *Studia Philosophiae Christianae* 25 (1987) 1, 21—51.

⁶ J. A. Chmurzyński, *W poszukiwaniu istoty życia*, w: *Organizm — jednostka biologiczna*, pr. zb. red. T. Zabłocka, Warszawa 1977, 41—66.

⁷ A. Latawiec, *Symulacja zjawiska biologicznego*, *Prace Szkoły Symulacji Systemów Gospodarczych W.G. 88*, Katowice 1988, 69—74.

Z systemem spotykamy się wówczas, gdy jakieś obiekty wraz z relacjami między nimi zachodzącymi tworzą całość z pewnego punktu widzenia. Obiekty wchodzące w skład danego systemu przyjęto nazywać jego elementami. System bez obiektów jest niemożliwy, chyba że wprowadzimy z przyczyn umownych pojęcie systemu pustego⁸, czyli pozbawionego elementów. Obiekty, które nie należą do danego systemu stanowią jego otoczenie. Uchwycenie relacji między poszczególnymi obiektami systemu ukazują jego dynamikę. Relacje zachodzące między obiektami to oddziaływania zachodzące między obiektami systemu. A zatem system wraz ze swym otoczeniem ma charakter dynamiczny. Obiekty należące do danego systemu mogą oddziaływać między sobą, ale także oddziałują na obiekty należące do ich otoczenia. Otoczenie oddziałuje na system, oraz system oddziałuje na jego elementy. Oddziaływanie otoczenia na system nazwano wejściem systemu; zaś oddziaływanie systemu na otoczenie — jego wyjściem. Wejścia i wyjścia stanowią tzw. elementy brzegowe systemu⁹.

Możemy ponadto mówić o wzajemnych oddziaływaniach między systemami, czyli o tzw. sprzężeniach szeregowych, równoległych i zwrotnych. Te ostatnie (tj. zwrotne) mogą być dodatnie lub ujemne. Sprzężenie zwrotne dodatnie doprowadza do coraz większego odchylenia od stanu równowagi funkcjonalnej systemu, zaś ujemne — zachowuje stan równowagi funkcjonalnej złożonego systemu rzeczywistego.

W otaczającej nas przyrodzie obserwujemy oddziaływanie (tzw. interakcje) przebiegające na różnych płaszczyznach: mechanicznej, chemicznej, elektrycznej, ekonomicznej i społecznej. Oddziaływanie to może być rozmaicie skoncentrowane przestrzennie i czasowo¹⁰. Powszechne rozumienie pojęcia systemu utożsamia je z uporządkowanym zbiorem elementów oddziałujących na siebie wzajemnie i stanowiących pewną całość¹¹, przy czym ten sam układ elementów może być traktowany jako autonomiczny system, a także jako część systemu większego. Może więc być dwojako charakteryzowany. Z jednej strony za pomocą takich pojęć jak: element, relacja,

⁸ M. Lubański, *Regulony i systemy*, dz. cyt., 31.

⁹ J. Jaroń, *Podstawy cybernetyki*, Wrocław 1976.

¹⁰ St. Mynarski, *Elementy teorii systemów i cybernetyki*, Warszawa 1979, 7.

¹¹ M. Lubański, Sz. W. Ślaga, *Aspekt systemowy problemu jedności nauki*, *Studia Philosophiae Christianae* 15 (1979) 1, 154.

sprzężenie, całość, z drugiej zaś — wejście, wyjście, przetwarzanie informacji, sterowanie¹². System można też opisywać poprzez wskazanie specyficznych własności, takich jak izolacja, jedność, centralizacja, sterowanie; poprzez cechy opisujące jego zachowanie jak zmienność, ekwifinalność, funkcyjowanie¹³.

Paradygmat systemowego patrzenia na rzeczywistość pozwala widzieć ją jako zespół systemów wraz z ich otoczeniem; a więc rzeczywistość to system wraz ze swym otoczeniem. Próba ujęcia samego systemu bez jego otoczenia lub samego otoczenia z wyłączeniem systemu prowadzi do abstrakcji. Nie istnieje bowiem system izolowany od otoczenia ani otoczenie oderwane od systemu¹⁴.

Podejście systemowe oznacza zespół koncepcji pozwalających na opisywanie i wyjaśnianie różnego typu obiektów i procesów za pomocą odpowiednio skonstruowanego aparatu pojęciowego. Podejście to oznacza także nowy kierunek badawczy i logiczno-metodologiczny traktujący obiekty i procesy jako systemy.

Jak słusznie zauważył Sz. W. Ślaga¹⁵, ogólna teoria systemów oraz wszelkie systemowe ujęcia pojawiły się na terenie nauk biologicznych wpływając w widoczny sposób na ich rozwój. Bertalanffy, tworząc podstawy swej teorii, dostrzegł braki ujęć analitycznych i witalistycznych. Dążył więc do sformułowania jednolitego systemu biologii teoretycznej. Zaczątki teorii systemów sformułowane zostały jeszcze przed 1940-tym rokiem, gdyż pierwsza rozprawa na ten temat ukazała się w *Die Naturwissenschaften* w 1940 roku¹⁶.

Teoria systemów została rozbudzowana i zaimplementowana między innymi przez J. G. Millera¹⁷ w odniesieniu do żywych, zorganizowanych systemów. Sam Bertalanffy pisał: „Pomieważ podstawową cechą istoty żywej jest jej organizacja, tradycyjne metody badania poszczególnych elemen-

¹² Por. analizę pojęcia systemu przeprowadzoną przez W. Sadowskiego, *Podstawy ogólnej teorii systemów*, Warszawa 1978, 112—113.

¹³ W. Sadowski, *Ogólna teoria systemów jako metateoria*, *Prakseologia* 1973, nr 2, 40 — cyt. za: M. Lubański, Sz. W. Ślaga, *Aspekt systemowy...*, dz. cyt.

¹⁴ M. Lubański, *Regulony...*, dz. cyt., 32.

¹⁵ Sz. W. Ślaga, *U podstaw biosystemogenezy*, dz. cyt., 30.

¹⁶ L. von Bertalanffy, *Der Organismus als physikalisches System Betrachtet*, *Die Naturwissenschaften*, 1940 nr 28, 251.

¹⁷ J. G. Miller, *Systemy żywe*, *Prakseologia* 1969 nr 34, 7; tenże, *Living systems; Structure and Process*, t. 10, 1965, nr 4.

tów i procesów nie mogą dać pełnego objaśnienia zjawisk życia... Dlatego też głównym zadaniem biologii musi być odkrywanie praw, które rządzą systemami biologicznymi (na wszystkich poziomach organizacji)¹⁸. Otóż dla J. G. Millera, wśród rozmaitych systemów pojawiają się takie, które charakteryzują się otwartością na oddziaływanie otoczenia, utrzymywaniem stałego stanu negentropii, czyli stanem organizacji i porządku, zawieraniem podsystemu sterującego całym układem (zapewniającego sprawne współdziałanie między jego elementami) oraz zintegrowaniem swych części w jedną całość obdarzoną zdolnością samoregulacji i rozwoju¹⁹.

Systemowy punkt widzenia podkreśla więc aspekt całościowy i dynamiczną rzeczywistość, która nas otacza. Rzeczywistość ta jawi się nam jako szereg dynamicznych systemów złożonych z podsystemów.

3. SYMULACJA NA TLE TEORII SYSTEMÓW

Symulacja, podobnie jak modelowanie na dobre wkroczyła na teren nauk biologicznych jako metoda badawcza. Bywa ona rozmaicie określana. Jest to niewątpliwie nowy sposób podejścia do badanego zjawiska²⁰. Tak na przykład C. S. Greenblat²¹ proponuje następujące określenie: jest to model operacyjny głównych cech lub elementów rzeczywistego lub zaproponowanego systemu, procesu lub środowiska. Symulacja jest więc w tym ujęciu formą modelu, jest modelem dynamicznym (w przeciwieństwie do modelu statycznego), zawierającym jedynie wybrane elementy systemu, przy czym systemy te mogą być zróżnicowane:

Przyjmujemy, iż symulacja to działanie modelu systemu przedmiotowego, realizowanego w określonym celu²². Jako

¹⁸ L. von Bertalanffy, *Historia rozwoju i status ogólnej teorii systemów*, w: *Ogólna teoria systemów*, pr. zb. red. G. J. Klira, dz. cyt., 30—31.

¹⁹ J. G. Miller, dz. cyt., 12 i 30.

²⁰ Poniższe rozważania zainspirowane zostały wypowiedzą Wł. Switalskiego 10.11.1989 r. w Krakowie, tj. referatu wygłoszonego przez niego nt. *Symulacja — symulologia; stare i nowe w modelowaniu*, na inauguracyjnych zajęciach w ramach Warsztatów Symulacyjnych w Akademii Ekonomicznej.

²¹ C. S. Greenblat, *Designing games and simulations. An illustrated handbook*, London 1988, 14.

²² R. F. Barton, *Wprowadzenie do symulacji i gier*, Warszawa 1974, 14—15.

eksperyment z modelem, symulacja ma pomóc w znalezieniu odpowiedzi na pytanie badacza analizującego zjawisko. Jest zatem symulacja narzędziem, metodą a nie celem. Jako technika eksperymentowania, symulacja to badanie systemu przedmiotowego (złożonego) przez obserwowanie zmian zachodzących w wpływającym czasie w dynamicznym modelu tego systemu pod wpływem zmieniających się warunków zewnętrznych i wewnętrznych w stosunku do systemu odwzorowywanych właściwym im modelem²³. Ponieważ system działa w określonych warunkach zewnętrznych wpływających na jego stany, (a więc i warunki zewnętrzne mają wpływ na zachowanie systemu), toteż w procesie symulacji te zewnętrzne i wewnętrzne warunki muszą być odwzorowywane za pomocą odpowiedniego modelu. Należy więc mocno podkreślić cechę otwartości systemu, polegającą na tym, że jak zauważył sam Bertalanffy, system wymienia z otoczeniem materię, energię i informację²⁴. Żywe organizmy są właśnie takimi systemami otwartymi. Pobierają one bowiem i oddają substancję materialną.

Układy żywe nie są systemami statycznymi zamkniętymi na świat zewnętrzny i zawierającymi zawsze te same składniki, lecz są w stanie quasi-stabilności. Utrzymują one stałą wartość relacji masowych przy ciągłej zmianie składników materialnych i energii, w których w sposób ciągły materiał krąży między nimi a otaczającym je środowiskiem.

Stabilność jest jednym z głównych kryteriów określania, czy organizm jest systemem. Najważniejsze procesy i zjawiska życiowe są konsekwencjami stanu stabilności. Na stan ten nakładają się procesy dwojakiego rodzaju: procesy okresowe mające początek w samym systemie, oraz chwilowe zmiany w otoczeniu wywołujące wahania stanu stabilności²⁵.

System otwarty może czynnie dążyć do stanu wyższej organizacji, czyli przechodzić od niższego do wyższego stanu uporządkowania za sprawą warunków panujących w danym systemie. Model systemu otwartego musi więc uwzględnić

²³ Określenie zaproponowane przez A. Metere, *Symulacyjna gra kierownicza — pojęcie i struktura* W: Prace Szkoły Symulacji Systemów Gospodarczych Lubachów 80, Wrocław-Gliwice 1980, 60 oraz rozszerzone przez Wł. Switalskiego, *Symulacyjne modele systemów ekonomicznych*, *Ekonomista* 1987 nr 6, 1202.

²⁴ L. von Bertalanffy, *Ogólna teoria systemów. Podstawy, rozwój, zastosowania*, Warszawa 1984, 156 i nast.

²⁵ *Tamże*, 156—157.

tę otwartość. Symulacja jako metoda badawcza jest szczególnie użyteczna w odniesieniu do takich właśnie modeli otwartych. Specyfika zjawisk biologicznych wymaga, by w badaniu traktować system jako otwarty.

Prześledźmy zatem, za Wł. Świtalskim²⁶, strukturę i wewnętrzne powiązania w symulacyjnym modelu prostego systemu otwartego. Model taki złożony jest z dwu części: z samego modelu systemu oraz z modelu otoczenia systemu. Do modelu tego prowadzą dwa wejścia zewnętrzne (1A oraz 1B). Stany wejścia 1A odpowiadają wartościom X_{pocz} , które inicjują warunki działania modelu badanego systemu. Jeśli $X_{pocz} = X_0$, to dalsze wartości X_t (dla $t = 1, 2, \dots$) są całkowicie generowane podczas symulacji. Jeśli natomiast $X_{pocz} = \langle X_0, \{X_t^z\} \rangle$, to następuje oddziaływanie pewnych zmiennych, których wartości ustala się *a priori* w scenariuszu symulacji.

Drugie wejście, oznaczone w modelu jako 1B, posiada zupełnie odmienny charakter. Jest to wpływ czynników pochodzących z zewnątrz, gdyż jak wiadomo, stan otoczenia systemu jest uzależniony od wielu czynników. Złożoność tych czynników powoduje, iż oddziaływanie otoczenia na system jest znacznie większe niż systemu na otoczenie. Dlatego też symulacja zachowania pojedynczego systemu powinna przebiegać przy założeniu, że można przewidzieć przyszłe stany otoczenia. Stąd też stany wejścia 1B należy przedstawić w postaci:

$$V_{pocz} = \langle V_0, \{V_t^z\} \rangle, \text{ dla } t = 1, 2, \dots$$

Aktualny stan otoczenia Z_t można wyliczyć po uwzględnieniu łącznego oddziaływania na model otoczenia ME wartości V_t^z , zmiennych pojawiających się w samosprężeniu 2B (oznaczamy je przez V_t), oraz zmiennych, które są wynikiem wpływu modelu systemu MF na model otoczenia (mamy tu na uwadze wejście zewnętrzne 3B, którego stany są równoważne stanom wejścia A4, czyli wejścia wewnętrznego do modelu systemu). Zmienne te oznaczamy przez Y_t .

Stan otoczenia Z_t można więc opisać następująco:

$$Z_t = ME(V_t^z, V_t, Y_t).$$

Na model systemu MF oddziałują: wejście scenariuszowe

²⁶ Wł. Świtalski, *Symulacyjne modele...*, dz. cyt., 1206—1208.

1A z bodźcami X_t^z , wejście samosprzężenia 2A z bodźcami X_t , oraz wejście z modelu otoczenia 3A równoważne z B4 wraz z bodźcami Z_t . Reakcje modelu można zatem przedstawić w postaci:

$$Y_t = MF(X_t, X_t^z, Z_t).$$

W przytoczonym modelu symulacyjnym otwartego systemu pojawiają się dwa analogiczne wyjścia: A5 oraz B5. Chwilowe stany modeli Z_t oraz Y_t występują na każdym z trzech wyjść odpowiadających im modeli, czyli na wyjściach zewnętrznych umożliwiających zapis przebiegu symulacji A5 oraz B5, na wyjściach o charakterze samosprzężeń 2A i 2B, a także na wyjściach oddziałujących na model towarzyszący B4 (równoważne 3A) i A4 (równoważne 3B). Jest oczywiste, iż przyjęto tu pewnego rodzaju uproszczenie ułatwiające formalny zapis działania całego systemu.

W przytoczonym modelu wykorzystano konwencję schematów przepływów. Zależności między zmiennymi wejściowymi (argumentami) a zmiennymi wyjściowymi (zmiennymi zależnymi) można przedstawić w postaci relacji lub funkcji. Ich postać jest uzależniona od typu modelowanego obiektu. Z powyższego wynika, iż aby uznać jakikolwiek model za model symulacyjny, należy uchwycić istnienie pętli sprzężenia zwrotnego między zmiennymi wyjściowymi wygenerowanymi przez model w okresie $t-1$, a zmiennymi wejściowymi wpływającymi na reakcje modelu w czasie t . W opisanym wyżej modelu własność ta jest szczególnie silnie widoczna, gdyż pojawia się kilka ciągów sprzężeń zwrotnych: samosprzężenia 2A i 2B, A4 równoważne 3B \longrightarrow ME \longrightarrow \longrightarrow B4 \equiv 3A oraz B4 \equiv 3A \longrightarrow MF \rightarrow A4 \equiv 3B. Jednocześnie warunkiem wystarczającym, by dany model uznać za symulacyjny, jest występowanie w postaci aktywnej otoczenia modelowanego systemu. Przez aktywną formę otoczenia rozumie się tu fakt wzajemnego oddziaływania (interakcji) modelu systemu i modelu jego otoczenia.

Podobne rozważania można przeprowadzić w odniesieniu do systemu zamkniętego. Okaże się wówczas, iż oba warunki (ten konieczny i ten wystarczający) do tego, by dany model uznać za model symulacyjny spełnione są także w przypadku prostego modelu systemu zamkniętego. Pojawia się tam również samosprzężenie. Jednakże dokładniejsze analizy systemu zamkniętego wykraczają poza ramy podejmowanego

zagadnienia. Równocześnie należy wyraźnie podkreślić, iż zrozumienie funkcjonowania żywych systemów możliwe jest dopiero w powiązaniu z ich otoczeniem. Właśnie takie ujęcie gwarantuje pełne poznanie organizmów żywych²⁷. Próba potraktowania układu żywego jako systemu zamkniętego może być uzasadniona jedynie chęcią zamierzonego przybliżenia zjawiska, przy pełnym uświadomieniu sobie konsekwencji płynących z takiego podejścia. W rzeczywistości każdy żywy układ musi być pojęty jako system otwarty wymieniający materię, energię i informację ze swym otoczeniem i wywierający nań dodatnie lub ujemne oddziaływanie.

Podejście symulacyjne odznacza się koniecznością odwzorowania czasu i sprzężenia zwrotnego w modelu, koniecznością uwzględnienia interakcji otoczenia oraz interakcji wewnątrz systemu. Można podjąć próbę sformułowania podstawowych własności modeli symulacyjnych²⁸. Najważniejsze z nich to:

- odtwarzanie zależności przyczynowo-skutkowych,
- nadanie parametrowi czasowemu funkcji porządkującej stany i zdarzenia,
- możliwość odtworzenia dynamiki systemu za pomocą pętli zwrotnych w modelu,
- uchwycenie interakcyjności między elementami modelu oraz między modelem a jego otoczeniem,
- możliwość odtworzenia struktur różnego typu (funkcjonalnych, organizacyjnych),
- zdolność odtworzenia procesów materialno-energetycznych, informacyjnych zachodzących w modelowanym systemie,
- multimodalność, czyli zdolność posługiwania się wieloma językami, wieloma sposobami odwzorowania sytuacji i procesów,
- możliwość odtworzenia sytuacji bardziej złożonych jak konkurencja, konflikt, kooperacja,
- możliwość odtworzenia pracy o charakterze zespołowym.

Dwie ostatnie cechy mają szczególnie duże znaczenia w przypadku symulacji złożonych zjawisk biologicznych. Nie

²⁷ Por. rozważania nt. żywych układów J. von Uexküll w pracy J. A. Chmurzyński, B. Sadowski, *Biologiczne mechanizmy zachowania*, Warszawa 1989, 6—9.

²⁸ Próbę taką podjął Wł. Switalski w cytowanym referacie inauguracyjnym w Krakowie, podczas spotkania Warsztatów Symulacyjnych.

wszystkie spośród obserwowanych zjawisk biologicznych są w pełni poznane. Pomimo, iż w życiu organizmów żywych obowiązują pewne ściśle określone prawa, to jednak nie zawsze są one w pełni przestrzegane. Pojawiają się zjawiska, procesy, których obecność świadczyć może o kierowaniu się układów żywych w swym zachowaniu dezinformacją. Takie zakłócenia w typowym funkcjonowaniu stanowią pewne trudności w podejmowaniu symulacji. Obecność tych zakłóceń jest jednak zauważana i poszukuje się coraz to nowych zabiegów symulacyjnych w celu pełnego przedstawienia procesów zarówno informacyjnych, jak i dezinformacyjnych.

4. ILUSTRACJA SYSTEMOWEGO UJĘCIA MODELU SYMULACYJNEGO

Modelowaniu poddaje się najczęściej wybrane fragmenty systemów biologicznych, to znaczy poszczególne mechanizmy, przebieg impulsów nerwowych itp. Wynika to z faktu, iż łatwiej jest dokonać pewnych uproszczeń, przybliżeń nie zmieniających w sposób zasadniczy przebiegu symulowanego procesu, gdy proces taki nie jest zbyt złożony, zbyt skomplikowany. Ujęcie całościowe zjawiska jest już bardzo trudnym zabiegiem. Uchwycenie bowiem złożoności, a zarazem wielkiej dynamiki zjawiska przebiegającej wielopłaszczyznowo, przekracza często możliwości jednego człowieka. Z tego też powodu podejście systemowe do zjawisk biologicznych jest podejściem pożądanym. Przytoczony niżej model o dużej skali złożoności, przedstawia system obejmujący wielką liczbę osobników połączonych zależnościami, powiązaniem o charakterze społecznym, powiązaniem, które w miarę upływu czasu ulegają różnym przemianom. Jest to model funkcjonowania rodziny pszczołej²⁹.

Rozważany system nie może być inaczej traktowany, jak tylko w powiązaniu ze swym otoczeniem, z którego pobiera odpowiednie do życia produkty, podlegając zarazem zakłócającym oddziaływaniom zeń pochodzącym. Te zakłócenia ze-

²⁹ R. Tadeusiewicz, *Cybernetic Modelling of the Bee Colony*, Postępy cybernetyki 7 (1984) 2, 31—41; R. Tadeusiewicz, *Metodologia modelowania cybernetycznego systemów biologicznych w: Modelowanie cybernetyczne systemów biologicznych*, Kraków 1979, 26—32; R. Tadeusiewicz, *Wybrane zagadnienia złożonych systemów biologicznych*, ZN AGE 58 (1978), 167—175; A. Migacz, R. Tadeusiewicz, *Model rodziny pszczołej w: Modelowanie cybernetyczne systemów biologicznych*, Kraków 1979, 133—143.

wewnętrzne to wejścia do systemu typu temperatury, zmieniających się opadów, warunków fenologicznych. Z tej racji model symulacyjny musi także odzwierciedlać element dynamiki otoczenia (środowiska). Uchwycenie tych wszystkich dynamicznych zależności nie jest łatwe. Wykonanie poniższego modelu wymagało posiadania dużej wiedzy płynącej z obserwacji i doświadczeń⁸⁰.

W modelu można wyróżnić 10 zasadniczych modułów, z czego dziewięć odzwierciedla funkcjonowanie samego układu (systemu), zaś dziesiąty jest modelem jego otoczenia (środowiska).

Podstawowym modułem modelu jest blok symulujący zjawisko rozrodu, dojrzewania i wymierania owadów. Rolę generatora rozwoju pełni tu matka pszczoła, dzięki czemu codziennie pojawia się pewna liczba jaj:

$$\Delta Y(k) = \left[A \frac{\sum_{i=k-9}^k x_{13}(i)}{10} + C \right] \cdot b(k)$$

gdzie: A i C — cechy genetyczne matki,
 k — numer bieżącego dnia (krok modelowania),
 x_{13} — odpowiednie spożycie nadmiarowe (wyjaśnienie niżej),
 b(k) — współczynnik wagowy uwzględniający niestacjonarność ograniczenia i indywidualną wydolność biologiczną matki:

$$b(k) = \begin{cases} 0 & \text{jeśli } U_{2P}(k-1) = 0 \text{ lub } y_1(k-1) \geq 3 \\ & y_4(k-1) \\ 1 & \text{jeśli } k \leq K_{kryt} \\ 1 - \frac{1}{E} \sum_1^k \Delta Y & \text{jeśli } k > K_{kryt}, \end{cases}$$

gdzie: K_{kryt} — genetycznie uwarunkowana długość okresu dynamicznego rozwoju rodziny pszczołej z uwzględnieniem rocznego cyklu rozwoju biologicznego. Złożone jaja przechodzą poszczególne fazy rozwoju, stąd na każdym k-tym

⁸⁰ J. A. Chmurzyński, *Tajemnice tańców pszczół* (cz. 1), Kosmos 142 (1976), 395—409; tenże, *Tajemnice tańców pszczół*, (cz. 2), Kosmos 143 (1976), 145—158; J. L. Gould, *Honey bee recruitment: the dance — language controversy*, Science 189 (1975) 204, 685—693.

kroku pojawia się $y(k)$ embrionów, $y_1(k)$ larw, $y_2(k)$ poczwarek, $y_3(k)$ owadów całkowicie ukształtowanych.

Wymienione wartości wylicza się z następujących wzorów:

$$\begin{aligned} y(k) &= \sum_{k-2}^k \Delta Y(i) & \Delta y_1(k) &= \Delta Y(k-3) \\ y_1(k) &= \sum_{k-5}^k \Delta y_1(i) & \Delta y_2(k) &= \Delta y_1(k-6) \\ y_2(k) &= \sum_{k-11}^k \Delta y_2(i) & \Delta y_3(k) &= \Delta y_2(k-12) \\ y_3(k) &= \sum_{k-34}^k \Delta y_3(i) \end{aligned}$$

Zbiór owadów y_3 jest zróżnicowany. Pojawiają się w nim osobniki pełniące ściśle określone funkcje. I tak wyróżniono w modelu: y_4 — pszczoły młode dziesięciodniowe, pełniące w rodzinie rolę karmicielek w procesie reprodukcji; y_5 — pszczoły w wieku 10—20 dni, wydzielające wosk i kudzujące plastry; y_6 — pszczoły zbieraczki, z których około 80% zbiera nektar, zaś 20% — pyłek.

$$y_3(k) = y_4(k) + y_5(k) + y_6^Q(k) + y_6^V(k),$$

gdzie: $y_6^Q(k)$ — zbieraczki nektaru, $y_6^V(k)$ — zbieraczki pyłku.

Pozyskiwanie nektaru opisuje równanie:

$$U_1(k) = c_1 l(k) p(k) y_6^Q(k)$$

gdzie: c_1 — jest stałą,

$l(k)$ — średnia liczba lotów wykonana przez jedną pszczołę,

$p(k)$ — funkcja wagi obrazująca efektywność lotów.

Ostatnie dwa parametry uzależnione są od środowiska; są tu funkcją temperatury, wielkości opadu i topografii dostępnych pożytków. Wprowadza się je do modelu z zewnątrz.

Pozyskiwanie pyłku opisuje równanie:

$$U_2(k) = c_2 l(k) p(k) y_6^V(k)$$

Pozyskiwanie nektaru $U_1(k)$ i pyłku $U_2(k)$ na kroku k (wykonywanie lotów) odbywa się kosztem zwiększonego spożycia zapasów, które wyliczone jest z wzoru:

$$X_{10}(k) = c_3 l(k) p(k) y_6^Q(k) + y_6^V(k)$$

Bieżącą zasobność środowiska określa funkcja $q_1(k)$ i $q_2(k)$. W przypadku, gdy $U_i(k) > q_i(k)$ przyjęto $U_i(k) = q_i(k)$, przy czym $i = 1, 2$.

Miód gromadzony jest w postaci:

niezasklepionej $U_{11}(k) = U_{11}(k-1) + U_1(k) + U_{11}^S(k)$;

zasklepionej $U_{12}(k) = U_{12}(k-1) + U_{12}^S(k)$,

zaś pyłek w postaci pierzgi

$U_{2P}(k) = U_{2P}(k-1) + U_2(k) + U_{2P}^S(k)$.

W modelu wyróżniono cztery grupy potrzeb. I tak potrzeby na podtrzymanie funkcji życiowych całej rodziny oblicza się z wzoru:

$$X_{11}^*(k) = c_4 y_3(k)$$

Produkt potrzebny do zapewnienia prawidłowego rozwoju larw w drugim stadium opisuje równanie:

$$X_{12}^*(k) = c_5 y_1(k)$$

Nadmiarowe spożycie związane z karmieniem i pielęgnacją larw przedstawia wzór:

$$X_{13}^*(k) = c_6 y_4(k) \text{ gdy } y_1(k) + y(k) > 0$$

Nadmiarowe spożycie związane z funkcją budowania plastrów i wytwarzania wosku wylicza się na podstawie wzoru:

$$X_{14}^*(k) = c_7 y_5(k) \text{ gdy } U_3(k) > 0$$

Potrzeby zaspokajane są według przyjętego systemu priorytetów. Realizuje to blok modelu kontrolujący stosunek potrzeb do zapasów. Wyróżnia się trzy przypadki:

$$U_{11}(k) \geq \sum_{j=1}^4 X_{1j}^*(k)$$

$$X_{11}^*(k) + X_{12}^*(k) \leq U_{11}(k) \leq \sum_{j=1}^4 X_{1j}^*(k)$$

$$U_{11}(k) < X_{11}^*(k) + X_{12}^*(k)$$

W pierwszym przypadku zapotrzebowanie może być pokryte i wówczas rzeczywiste spożycia są równe zapotrzebowaniom:

$$X_{1j}(k) = X_{1j}^*(k); \quad j = 1, \dots, 4$$

W drugim przypadku zaspokajane są spożycia priorytetowe:

$$X_{11}^*(k) = X_{11}(k) \text{ i } X_{12}^*(k) = X_{12}(k)$$

zaś pozostałe są uszczuplane:

$$X_{13}(k) = \frac{X_{13}^*(k)}{X_{13}^*(k) + X_{14}^*(k)} [U_{11}(k) - X_{11}^*(k) - X_{12}^*(k)]$$

$$X_{14}(k) = U_{11}(k) - X_{11}(k) - X_{12}(k) - X_{13}(k)$$

W trzecim przypadku przyjmuje się:

$$X_{11}(k) = X_{11}^*(k), X_{12}(k) = X_{12}^*(k), X_{13}(k) = X_{14}(k) = 0.$$

Spożycie pyłku wyliczone jest z zależności:

$$X_{21}(k) = c_8 X_{11}(k); \quad X_{22}(k) = c_9 X_{12}(k);$$

$$X_{24}(k) = c_9 X_{14}(k). \quad X_{23}(k) = c_9 X_{13}(k);$$

Realizacja tych spożyć następuje tylko wówczas, gdy istnieje dla nich pokrycie w postaci odpowiednich zapasów $U_{2P}(k)$.

Wydawanie zapasów odbywa się na dwu etapach., Najpierw określa się pewne pomocnicze wartości:

$$U_{2P}^1(k) = U_{2P}(k) - \sum_{j=1}^4 X_{2j}(k)$$

$$U_1^1(k) = U_{11}(k) - U_{12}(k) - \sum_{j=1}^4 X_{1j}(k).$$

Aby system mógł przeżyć potrzebne jest spełnienie warunków: $U_{2P}^1(k) > 0$ i $U_1^1(k) > 0$. Gdy nie są one spełnione, systemowi zagraża zagłada. Jedynym ratunkiem jest ingerencja człowieka w postaci dodatniego $U_{11}^s, U_{12}^s, U_{2P}^s$, bądź w przypadku pojawienia się sprzyjających warunków zewnętrznych. Wydatkowanie pewnej liczby produktów na budowę plastrów oblicza się według wzorów:

$$X_{15}(k) = c_{10} U_3(k) \text{ oraz } X_{25}(k) = c_{11} U_3(k)$$

o ile zasoby $U_1^1(k)$ i $U_{2P}^1(k)$ na to pozwalają. Przy czym $U_3(k)$ oznacza tu ilość wytworzonego wosku na k -tym kroku.

W następnym kroku oblicza się nowe wartości bilansowe:

$$U_{11}^2(k) = U_{11}(k) - \sum_{i=1}^5 X_{1i}(k).$$

Jeśli wartość ta jest dodatnia, to należy uznać że na pokrycie zapotrzebowań rodziny pszczelej wystarczył miód odsklepiony i że pewna jego ilość pozostała. Część tej pozostałości zostanie zasklepiona i wówczas:

$$U_{11}(k) = U_{11}^2(k) - \Delta U_{12}(k) - X_{16}(k)$$

$$U_{12}(k) = U_{12}(k) + \Delta U_{12}(k)$$

gdzie: $\Delta U_{12}(k)$ jest ilością miodu zasklepionego na k -tym kroku,

$X_{16}(k)$ jest wielkością dodatkowego spożycia wynikłego z konieczności wykonania pracy związanej z przeróbką i zasklepieniem.

Wielkości te oblicza z wzorów:

$$\Delta U_{12}(k) = c_{12}U_{11}^2(k) \text{ oraz } X_{16}(k) = c_{13} \Delta U_{12}(k)$$

Jeśli wartość $U_{11}^2(k)$ jest ujemna, czyli zaszła konieczność odsklepienia miodu, to:

$$U_{11}(k) = 0 \text{ zaś } U_{12}(k) = U_{12}(k) + U_{11}^2(k).$$

We wszystkich przypadkach:

$$U_{2P}(k) = U_{2P}(k) - \sum_{j=1}^6 X_{2j}(k).$$

Wartości $U_{11}(k)$, $U_{12}(k)$, $U_{2P}(k)$ są wykorzystywane w następnym kroku symulacji ($k+1$).

Całość modelu domyka niejako model procesu budownictwa. Przyjęto w nim, że ilość wosku, jaka może być wytworzona na etapie k wynosi:

$$U_3(k) = \left[\frac{\sum_{i=k-10}^{k-10} X_{13}(i)}{k-10+n} c_{14} + c_{15} \right] y_5(k)$$

W celu identyfikacji i weryfikacji modelu obliczane są w nim wielkości zagospodarowanej przez rodzinę pszczałę powierzchni plastrów:

$$S_y(k) = c_{17}y(k) + y_1(k) + y_2(k)$$

$$S_u(k) = c_{18}2U_{11}(k) + U_{12}(k) + U_{2P}(k),$$

gdzie:

S_y to obszary plastrów zajęte przez pośrednie formy rozwojowe pszczoły,

S_u to obszary zajęte przez zapasy.

Pojawiające się w modelu wartości stałych c_1, c_2, \dots, c_{18} oszacowano na podstawie eksperymentów i literatury.

Zaprezentowany model symulacyjny rodziny pszczelej ukazuje ogromną złożoność zachowań w obrębie układu. Schemat struktury uwzględnia wewnętrzną złożoność systemu. Obej-

muje bowiem moduły: rozwoju populacji, zmiany struktury podzbioru funkcji „praca”, odnowy zapasów, stanu zapasów, potencjalnego zapotrzebowania, kontroli poziomu zapasów, realizacji zapotrzebowań, budownictwa, zajętej powierzchni użytkowania i kubatury przestrzeni. Dodatkowym modułem modelu jest otoczenie systemu, z którym następuje dynamiczna wymiana informacji, energii, materii.

5. ZAKOŃCZENIE

Celem prezentacji systemowego ujęcia symulacji zilustrowanego symulacyjnym modelem rodziny pszczelej było ukazanie znaczenia teorii systemów i symulacji w badaniach nauk biologicznych. Ogromna złożoność zjawisk biologicznych przyczynia się do poszukiwań coraz to nowych sposobów ich badania. Bez pomocy komputerowego modelu symulacyjnego poznanie praw, zależności w obrębie systemu, wzajemnych oddziaływań poszczególnych elementów na siebie, na otoczenie, jak i otoczenia na cały złożony system napotkałoby na wiele trudności metodologicznych i technicznych. Model symulacyjny pozwala na uchwycenie istoty dynamiki zjawisk biologicznych w wielu płaszczyznach. Pozwala też na obserwacje wpływu zmiany poszczególnych parametrów na system i jego otoczenie. Systemowe ujęcie symulacji znacznie zwiększa możliwości poznawcze eksperymentatora.

Można na symulację potrząść też i z innego punktu widzenia. Można traktować ją w kategorii relacji (podobnie jak czyni to J. R. Griesemer i M. J. Wade³¹) do innych typów systemów, czy też w zestawieniu z typowo relacyjnym ujęciem (jak proponował M. Bunge³²). Wydaje się, iż propozycja systemowego traktowania metody symulacji w odniesieniu do żywych układów powinna zachęcić do dalszych badań i analiz.

³¹ J. R. Griesemer, M. J. Wade, *Laboratory models, causal explanation and gaus selection*, *Biology and philosophy*, 3 (1988) 1, 67—96 — autorzy dokonują porównania systemów naturalnych z laboratoryjnymi, matematycznymi oraz z etapem tworzenia koncepcji. W zestawieniu tym znalazło się też miejsce dla symulacji.

³² M. Bunge, *Analogy, simulation, representation*, *Revue internationale de philosophie*, 23 (1969), 16—33 — na stronach 20—21 podaje on określenie symulacji w języku relacji następująco: — obiekt x należący do A lub C symuluje (imituje, kopiuje) obiekt y w O , jeśli: 1) x jest odpowiednio analogiczny do y i 2) ta analogia

LA SIMULATION DES PHÉNOMÈNES BIOLOGIQUES DU POINT DE VUE DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES

Résumé

Dès ses débuts la théorie des systèmes a été jugée comme très intéressante. On voyait en elle une nouvelle façon d'interpréter la réalité qui nous entoure, car ladite théorie prend tout spécialement compte de l'intégralité et du dynamisme de cette réalité.

Le phénomène biologique a lieu à tous les niveaux grâce à l'information biologique (conçue très dynamiquement). La simulation est une nouvelle façon d'approcher ce phénomène.

Le but du présent article est de faire apparaître 1° le rôle de la théorie des systèmes dans un effort de compréhension de la réalité, et 2° les profits qui résultent de l'application des méthodes de simulation aux phénomènes dynamiques analysés du point de vue la théorie des systèmes.

Cette théorie a donc été esquissée, puis à l'aide de ses notions a été présentée la possibilité de traiter la simulation du point de vue de la théorie des systèmes. Un modèle de simulation d'une famille d'abeilles sert d'exemple à cette possibilité.

jest wartościowa z samym x lub z trzecią częścią w N dominując lub kontrolując x . Dalej autor przytacza różne rodzaje symulacji z podaniem ilustracji.