

Stefan WĘGRZYN

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

## NANOSYSTEMY INFORMATYKI

**Streszczenie.** Oprócz, tworzonych obecnie przez ludzi, technicznych systemów informatycznych na Ziemi istnieją od dawna w organizmach żywych systemy informatyczne, które były i są podstawą rozwoju całego współczesnego świata organizmów żywych. Zbadanie tych systemów jest niezbędne zarówno dla naszych ogólnych potrzeb cywilizacyjnych, jak i do wykorzystania poznanych tam rozwiązań we współczesnych technicznych systemach informatyki. W niniejszym opracowaniu przedstawia się charakterystykę molekularnych systemów informatycznych istniejących w organizmach żywych od strony informatyki jako dyscypliny naukowej.

## INFORMATICAL NANOSYSTEMS

**Summary.** Long before humans began building machine information systems, living organisms have relied on the own information systems to build what we now know as the Earth's biosphere. Exploring those systems is essential for the general awareness of our civilisation. It is also imperative for the developing of machine information systems by using the solutions that can be found in biology. The present work describes the molecular information systems of life from the point of view of information science.

### 1. Nanotechnologie

Przez technologie rozumiemy ogólnie sposoby realizacji, np. produktów, urządzeń czy obiektów. Technologie określają zbiory podstawowych elementów składowych, które są w nich wykorzystywane, a następnie zbiory odpowiednich operacji, które na tych elementach należy wykonać, aby otrzymać pożądany produkt, urządzenie ewentualnie obiekt [1].

Rodzaj i rozmiary podstawowych elementów składowych, na których opierają się różne technologie, są różne.

Technologie, które wykorzystują jako podstawowe elementy składowe pojedyncze molekuly czy atomy, a więc elementy o rozmiarach nanometra (przyrostek *nano* oznacza  $10^{-9}$ ), będziemy nazywali *nanotechnologiami molekularnymi* (lub krótko *nanotechnologiami*).

Nanotechnologie wymagają systemów umożliwiających umieszczenia dowolnej molekuly lub atomu w wyznaczonym miejscu tworzonej struktury z atomów czy z molekuł, z precyzją 0,1 nanometra, to jest amplitudy drgań termicznych molekuł i szybkości rzędu miliona operacji na sekundę. Problemem fundamentalnym jest poznanie rozwiązań, dzięki którym tworzone w tej technologii obiekty posiadają własności samoreplikacji.

Procesy realizacji obiektów oparte na molekularnych nanotechnologiach, sterowane przez odpowiednie systemy informatyczne były i są podstawą rozwoju całego współczesnego świata organizmów żywych. Dlatego pełne poznanie molekularnych nanotechnologii realizowanych pod nadzorem odpowiednich molekularnych informatycznych systemów sterujących ma ogromne znaczenie dla informatyki jako dyscypliny naukowej badającej prawa rządzące procesami kodowania, zapisywania, przekształcania i rozprowadzania danych. Takie badania są niezbędne zarówno dla naszych potrzeb ogólnocywilizacyjnych, jak i dla wykorzystania poznanych rozwiązań we współczesnych technicznych systemach informatyki.

## 2. Molekularne (biologiczne) systemy informatyki

Zarówno w molekularnych (biologicznych) systemach informatycznych sterujących procesami realizacji nanotechnologii, jak i we współczesnych technicznych systemach informatyki reprezentowana jest ta sama podstawowa koncepcja informatyki jako dyscypliny naukowej, to znaczy najpierw algorytm rozwiązania danego problemu, następnie wynikający z niego program, a w końcu organizacja procesu realizacji programu w systemie składającym się z części urzędzeniowej wraz z systemem operacyjnym nadzorującym proces realizacji programu [2].

Ta podstawowa koncepcja jest wspólna zarówno dla molekularnych systemów informatyki występujących w organizmach żywych, jak i dla współczesnych technicznych systemów informatyki, choć występują pewne różnice w sposobie jej realizacji w biologicznych i technicznych systemach informatycznych.

W technicznych układach informatyki bity są reprezentowane przez makroukłady elektroniczne lub magnetyczne o dwóch wyróżnionych stanach oznaczonych symbolami 0, 1, zaś w biologicznych układach informatyki, odpowiadające bitom nukleotydy są reprezentowane przez cztery pojedyncze molekuly zasad azotowych oznaczanych symbolami *A* (adenina), *C* (cytozyna), *G* (guanina), *T* (tynina).

Stąd te różnice, a więc leżąca u podstaw technicznych układów informatyki logika dwuwartościowa i leżąca u podstaw biologicznych systemów informatyki - logika czterowartościowa. Czy są to różnice wynikające z jakichś głębszych powodów, czy są tylko przypadkowe?

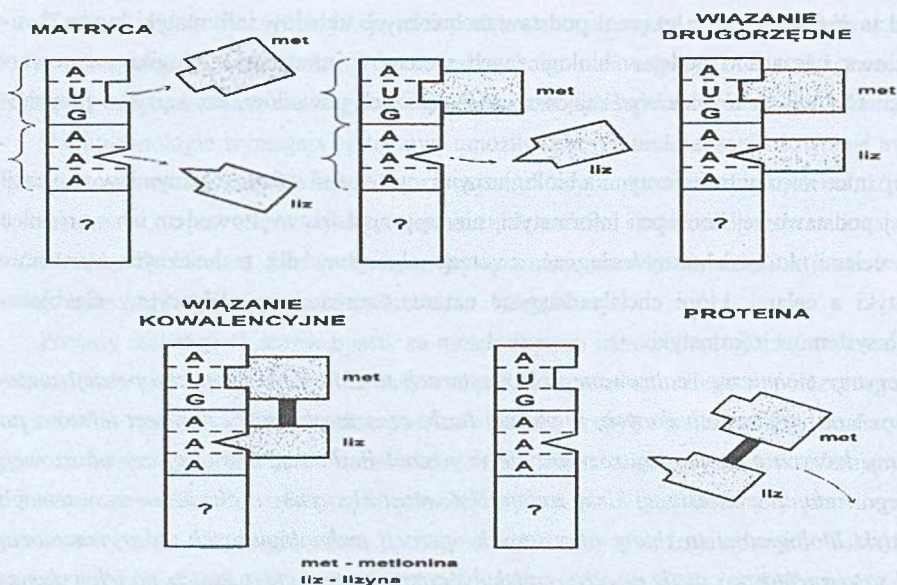
Te różnice między technicznymi a biologicznymi systemami informatycznymi, w realizacji wspólnej podstawowej koncepcji informatyki, nie są przypadkowe. Powodem ich są różnice między celami, które chcemy osiągnąć, tworząc algorytmy dla technicznych systemów informatyki a celami, które chciała osiągnąć natura, tworząc swoje algorytmy dla biologicznych systemów informatyki.

*Algorytmy techniczne realizowane w komputerach to zbiory określonych operacji matematycznych na wskazanych danych, w postaci liczb, czasem obrazów czy nawet tekstów, po wykonaniu których otrzymujemy rozwiązanie w postaci liczbowej, tekstowej czy obrazowej, dowolnego zadania z określonej klasy zadań. Natomiast algorytmy realizowane w systemach informatyki biologicznej to zbiory określonych operacji technologicznych na argumentach, którymi są elementarne cząstki materii, molekuły, atomy i operacje takie, że po ich wykonaniu otrzymujemy jako wynik kompletny obiekt materialny - organizm biologiczny.*

W skrócie można więc powiedzieć, że danymi dla algorytmów technicznych są liczby, operacjami są operacje matematyczne, a wynikami procesów ich realizacji są też liczby, natomiast dla algorytmów biologicznych danymi są cząstki materii (molekuły), operacjami są operacje technologiczne, a wynikiem procesów ich realizacji są obiekty (organizmy biologiczne).

### 3. Operacje i sterowanie nimi w biologicznych systemach informatyki

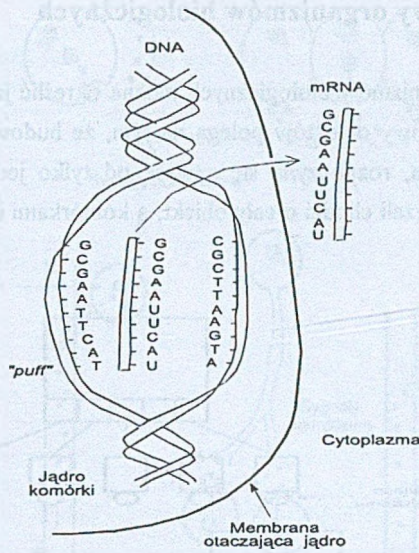
Podstawowymi składnikami organizmów biologicznych są białka, które są łańcuchami molekuł aminokwasów. Dlatego podstawowymi składnikami algorytmów biologicznych są programy syntezy białek, zwane genami strukturalnymi, a operacjami elementarnymi tych algorytmów są operacje łączenia molekuł aminokwasów, tak jak to ilustruje rys. 1. Oprogramowanie natomiast to, podobnie jak w informatycznych systemach technicznych, zbiór programów, których realizacja odbywa się pod nadzorem systemu operacyjnego. Pełny zbiór programów genów strukturalnych i sterujący nimi system operacyjny są zapisane w każdej komórce w tak zwanym łańcuchu DNA. Objętość zajmowana przez system operacyjny może dochodzić do około 80% objętości całego łańcucha DNA.



Rys. 1. Ilustracja elementarnej operacji technologicznej tworzenia białka  
 Fig. 1. Elementary technological operation of protein synthesis

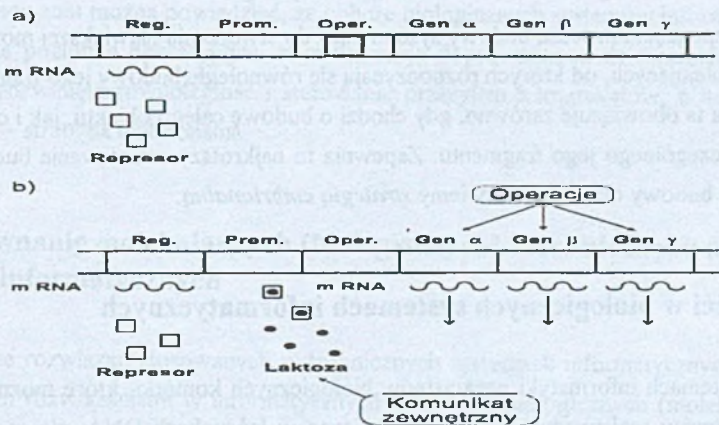
Kompletne zbiory programów zakodowane w łańcuchu DNA znajdują się w każdej komórce organizmu biologicznego. Sposób realizacji programów informatycznych w organizmach biologicznych jest równoległy, i to na najniższym poziomie operacyjnym. Równoległy, to znaczy, że kilka różnych operacji jest wykonywanych w tym samym momencie czasu. Nawet wyprowadzenie odpowiednich fragmentów programu do przestrzeni operacyjnej (cytoplazma) ma charakter równoległy. Najpierw, w odpowiednim miejscu łańcucha DNA następuje wybrzuszenie (puff), następnie proces transkrypcji, czyli przepisanie potrzebnego fragmentu tekstu DNA na mRNA, przy czym molekuly tyminy T zostają zastąpione przez molekuly uracylu U, po czym tak utworzony program mRNA zostaje w całości wyprowadzony do przestrzeni operacyjnej, gdzie jest podstawą syntezy potrzebnej w danym momencie substancji. Ilustruje to rys. 2. Operacje są sterowane przesyłem komunikatów między komórkami. Ilustruje to rys. 3, na którym przedstawiono zasadę aktywizacji genów strukturalnych według teorii Jacoba i Monoda.

Gdy brak jest laktozy, represor blokuje operator i transkrypcja genów strukturalnych nie następuje. W obecności laktozy represor staje się nieaktywny i zachodzi transkrypcja genów strukturalnych inicjujących proces syntezy. Pojawienie się laktozy można więc traktować jako komunikat sterujący operacją syntezy.



Rys. 2. Proces tworzenia i wyprowadzenia do przestrzeni operacyjnej programu mRNA

Fig. 2. The process of mRNA creation and introduction in to operation space

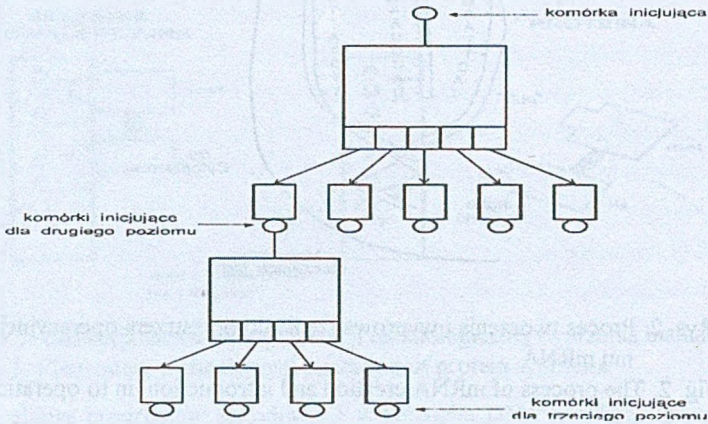


Rys. 3. Aktywizacja genów strukturalnych przesłaniem komunikatów według Jacoba-Monoda (nagroda Nobla)

Fig. 3. Structured gene activation by message transmission to Jacob and Monod (Nobel price)

## 4. Strategie budowy organizmów biologicznych

Strategie budowy organizmów biologicznych można określić jako strategię embrionalną. Strategia embrionalna budowy obiektów polega na tym, że budowę całego obiektu, jak też dowolnego jego fragmentu, rozpoczyna się zawsze od tylko jednego elementu, zwanego krótko *komórką matką*, jeżeli chodzi o cały obiekt, a komórkami inicjującymi – jeżeli chodzi o jego fragmenty (rys. 4).



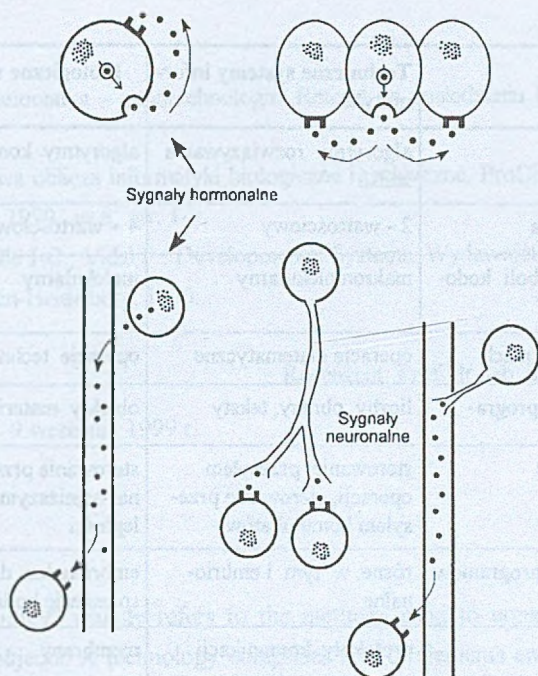
Rys. 4. Ilustracja embrionalnej strategii budowy obiektu  
Fig. 4. Embryonic strategy of object generation

Po rozpoczęciu procesu budowy system dąży do stworzenia największej możliwej liczby komórek inicjujących, od których rozpoczynają się równoległe budowy jego fragmentów.

Zasada ta obowiązuje zarówno, gdy chodzi o budowę całego obiektu, jak i o budowę każdego poszczególnego jego fragmentu. Zapewnia to najkrótszy czas trwania budowy obiektu. Tę metodę budowy obiektów nazwiemy *strategią embrionalną*.

## 5. Sieci w biologicznych systemach informatycznych

W systemach informatyki organizmów biologicznych komórki, które można przyrównać do komputerów realizujących programy zapisane w łańcuchach DNA, nie są stanowiskami izolowanymi, autonomicznymi, lecz węzłami sieci, w której przesyłane są komunikaty zewnętrzne (międzykomórkowe) i wewnętrzne (komórkowe). Komunikaty przesyłane są w oparciu o media hormonalne i o media neuronalne (rys. 5).



Rys. 5. "Komputerowe" sieci w informatycznym systemie biologicznym  
 Fig. 5. "Computer" networks in a biological information system

W podsumowaniu można powiedzieć, że oblicze biologicznych systemów informatyki charakteryzuje, na poziomie operacyjnym, miniaturyzacja doprowadzona do poziomu molekuł, maksymalnie rozwinięta równoległość i sterowanie przesyłem komunikatów, a na poziomie strategicznym – strategia embrionalna.

## 6. Porównanie molekularnych (biologicznych) i technicznych systemów informatycznych

Porównanie rozwiązań stosowanych w technicznych systemach informatycznych z odpowiadającymi im rozwiązaniami w informatycznych systemach biologicznych (molekularnych) przedstawia podane poniżej zestawienie tabelaryczne (tab. 1.)

Analizując to porównanie, można stwierdzić, że trendy rozwojowe w aktualnych technicznych systemach informatyki w wielu przypadkach dążą do rozwiązań cechujących nano-informatyczne (biologiczne) systemy informatyki.

Tabela 1

	Techniczne systemy infor- matyki	Biologiczne systemy informatyki
Źródła programów	algorytmy rozwiązywania zadań	algorytmy konstrukcji obiektów
Systemy kodowania	2 - wartościowy	4 – wartościowy
Fizyczny zapis symboli kodowych	makromolekularny	molekularny
Operacje w algorytmach	operacje matematyczne	operacje technologiczne
Wyniki realizacji programów	liczby, obrazy, teksty	obiekty materialne
Systemy operacyjne	sterowanie przesyłem operacji, sterowanie przesyłem komunikatów	sterowanie przesyłem komunikatów na najniższym poziomie równoległości
Strategia realizacji programów	różne, w tym i embrionalne	embryonalne, dające największe przyspieszenie budowy obiektów
Komunikacja	protokoły komunikacji	membrany

## 7. Systemy rozwijające się

Przez systemy rozwijające się rozumiemy systemy dynamiczne, których elementy ulegają stale pewnym podziałom i transformacjom, dzięki którym – poczynając od jednego początkowego elementu (komórki matki) – powstaje docelowy obiekt [3]. W tym jednym początkowym elemencie zakodowane są wszystkie dane (informacje) wykorzystywane następnie w całym rozpoczynającym się od tego elementu procesie rozwoju, a kończącym się powstaniem obiektu docelowego posiadającego zarówno strukturę fizyczną, jak i zakodowane w nim własne oprogramowanie.

Pełne poznanie tych procesów jest dziś sprawą o podstawowym znaczeniu zarówno dla biologii molekularnej jak i dla informatyki jako dyscypliny naukowej badającej prawa rządzące procesami kodowania, przechowywania, przekształcania i przesyłania danych.

Ukoronowaniem tych badań byłyby analiza od strony informatyki jako dyscypliny naukowej procesów samoreplikacji, zachodzących w molekularnych nanosystemach informatyki organizmów biologicznych.



## LITERATURA

1. Cempel C.: Nanonauka – nanotechnologie. Referat na posiedzeniu Prezydium PAN, 15 czerwca 1999.
2. Węgrzyn S.: Dwa oblicza informatyki biologiczne i techniczne. *ProDialog*. Wydawnictwo *Nakom*. Poznań 1999, nr 8, str. 1-9.
3. Węgrzyn S., Gille J-C., Vidal P.: *Developmental Systems*. Wydawnictwo Springer-Verlag. New York-Berlin-Heidelberg, 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Grzywak

Wpłynęło do Redakcji 9 września 1999 r.

## Abstract

The word „technology” usually refers to the methods used to construct a category of products, devices or objects. A technology comprises sets of elements and sets of operations performed upon those elements in order to create a particular product, device or object.

The inception and development of biological organisms relies on nanotechnology, i.e. a technology where molecules and atoms are the basic structural elements.

The control mechanisms quiding biological ontogenesis also depend on patterns of molecules and atoms; we shall refer to them as information nanosystems of living organisms.

Both the man-built machine information systems and the information nanosystems of organisms follow the same principle: first, there is an algorithm; then, it becomes a program; then, the program is coded, and finally, a process of execution takes place.

A cardinal difference between machine information systems and the information nanosystems of organisms is their purpose. Machine information systems are built to solve nmathematical or logical problems, whereas the algorithms implemented by the information nanosystems of organisms are aimed at building the organisms themselves.

This difference of purpose explains the different organisation of certain operational procedures and structural frames between the two types of information systems.