

RYSZARD TADEUSIEWICZ

Badanie właściwości układów samodzielnych współdziałających ze stochastycznie zmiennym środowiskiem*

Układ samodzielny jest hipotetycznym tworem cybernetycznym, wprowadzonym przez Mariana Mazura, charakteryzującym się m. in. zdolnością do aktywnego trwania w środowisku oraz do sterowania swoim zachowaniem, zmierzającym do maksymalizacji czasu przeżycia. W pracy zaprezentowano model symulacyjny systemu obejmującego układ samodzielny wraz ze środowiskiem oraz przytoczono wyniki niektórych eksperymentów przeprowadzonych z wykorzystaniem tego układu. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki potwierdzają oryginalność tworu, jakim jest układ samodzielny, nie potwierdzają jednak generalnie tezy o głębszym podobieństwie między układami samodzielnymi a organizmami żywymi. W pracy przedyskutowano szczegółowo wpływ czynnika przypadkowego występującego w środowisku na zachowanie się układu samodzielnego oraz wyniki prób zmierzających do ustalenia wpływu wiedzy „dziedziczonej” na szanse przeżycia.

Wprowadzenie

W pracy [1] zdefiniowany został pewien układ cybernetyczny, nazwany „układem samodzielnym”, odznaczający się m. in. tym, że jest stosunkowo niezależny od otoczenia i że steruje swoim zachowaniem opartym na kryterium odpowiednio określonego „własnego interesu”. W pracy tej opis właściwości układu samodzielnego oparto na rozważaniach typu werbalnego, popartych jedynie w pewnym stopniu elementarną analizą matematyczną, nie uwzględniono natomiast prawie zupełnie interakcji pomiędzy układem samodzielnym a otoczeniem i w minimalnym jedynie stopniu zajęto się problemem, w jak sposób układ samodzielny mógłby wykorzystywać swoje właściwości w celu takiego współdziałania ze środowiskiem, które zapewniłoby mu maksymalny czas egzystencji. Tymi właśnie zagadnieniami zajęto się

* Referat wygłoszony na Ogólnopolskiej Konferencji „Modelowanie cybernetyczne systemów biologicznych”, Kraków 1978 (współorganizowanej przez PTC).

w niniejszej pracy, przy czym ze względu na trudności czysto analitycznej dyskusji właściwości złożonego wielowymiarowego systemu, jakim jest układ samodzielny wraz ze środowiskiem, zdecydowano się na metodę badawczą polegającą na symulacyjnym badaniu systemu złożonego z układu samodzielnego i środowiska na maszynie cyfrowej.

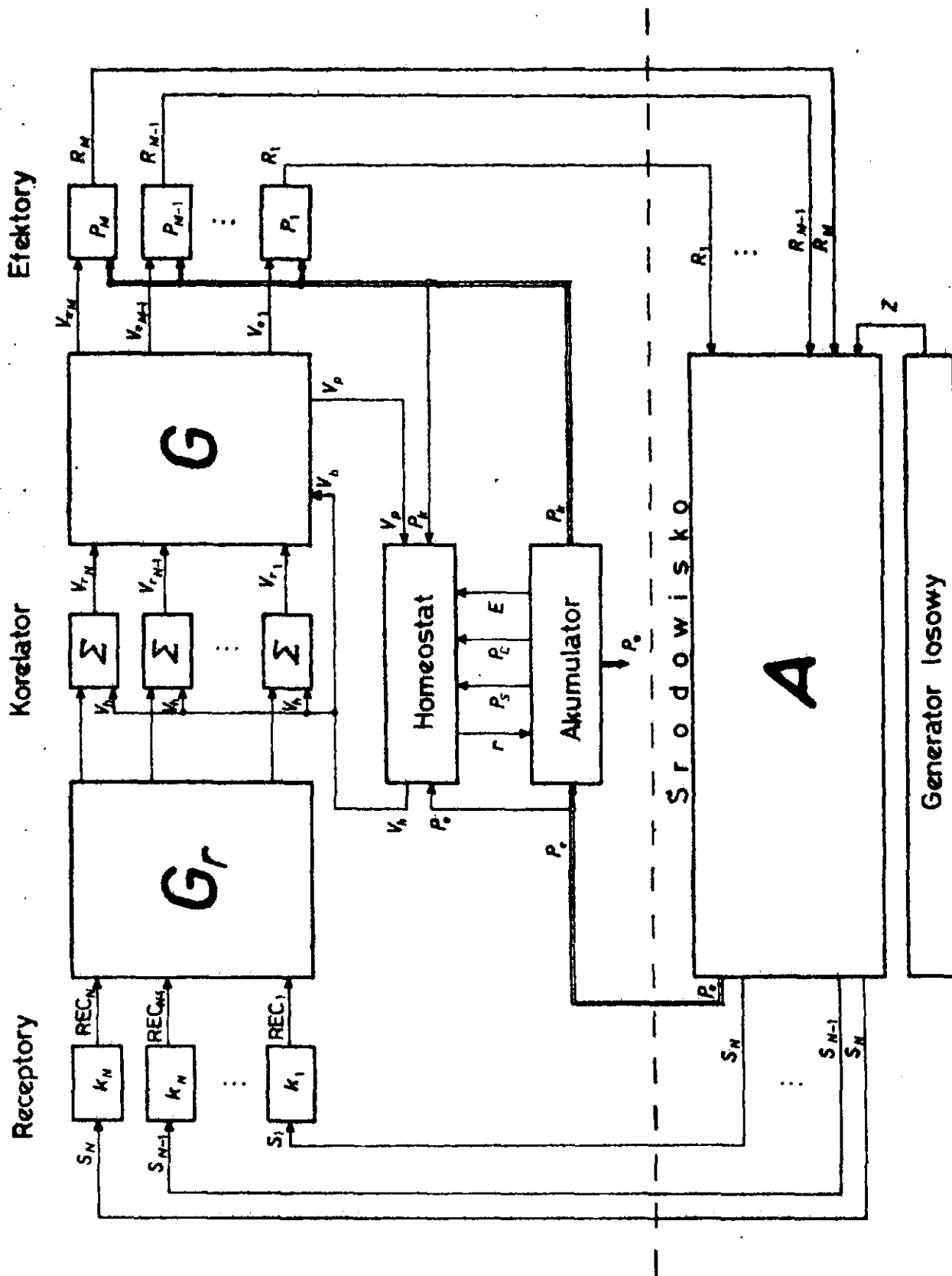
1. Opis modelu

Schemat blokowy poddawanego symulacji układu przedstawiono na rysunku 1. Schemat ten jedynie w minimalnym stopniu odbiega od schematów podawanych w pracy [1]; rozbieżności te są wynikiem doświadczeń [3], w których stosowano model dokładnie wzorowany na koncepcji zawartej w pracy [1]. Jak widać, w układzie wyróżnić można dwa elementy składowe: układ samodzielny i jego środowisko. Pomiedzy układem a środowiskiem zachodzi wymiana informacji i energii, przy czym działanie środowiska zawiera także element losowy. Nie rozwijając tu tego tematu zbyt szeroko wypada wspomnieć, że były prowadzone badania zmierzające do określenia wpływu stopnia losowości środowiska na zachowanie się układu samodzielnego [3]. W ich rezultacie okazało się, że przy silnej dominacji czynnika przypadkowego w środowisku obserwowano brak samodoskonalenia się układu. Modelowany układ dążył wówczas do stałego utrzymywania na swoich wyjściach takiego kompletu sygnałów wyjściowych, który gwarantowałby możliwie niewielkie straty i najczęściej ginął z powodu wykonania niewłaściwej reakcji, powodującej gwałtowne malenie mocy dostarczanej ze środowiska.

W niniejszej pracy przedyskutowane będą wyniki eksperymentów dokonanych ze środowiskiem opisanym następującymi zależnościami:

$$\begin{bmatrix} S \\ P_s \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} R \\ Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie S jest N -elementowym wektorem sygnałów wejściowych podawanych na N kolejnych wejść (receptorów) układu samodzielnego, P_s jest mocą, jaką układ w danym momencie czasu zdołał pobrać od otoczenia, A jest macierzą liczbową o stałych współczynnikach (założono stacjonarność środowiska), mającą wymiary $M+1$ kolumn i $N+1$ wierszy, R jest wartością reakcji na kolejnych wyjściach (efektorach) układu samodzielnego w poprzednim momencie czasu (ponieważ układ ma M wyjść, przeto R jest wektorem M -elementowym), natomiast Z jest wartością otrzymywaną z multiplikatywnego generatora liczb pseudolosowych. Dobiierając odpowiednio współczynniki macierzy A spowodowano, że w zależności od reakcji układu R moc dostarczana do układu P_s mogła rosnać lub zmniejszać się, w wyniku czego układ miał możliwość wykrywania pewnych czynności jako korzystnych, a innych jako szkodliwych. W przypadku, kiedy z obliczeń wynikało $P_s \leq 0$ podawano $P_s = Z$. Należy podkreślić, że Z miało wartość zdecydowanie mniejszą od wartości P_s w warunkach poprawnych reakcji układu. Dodatkowo przewidziano specjalny



Rys. 1

system premiowania układu za wysiłek wkładany w intensywniejsze reakcje: jeśli układ wykonał reakcję taką, że

$$\sum_{i=1}^M R_i > \theta_1 \quad (2)$$

gdzie θ_1 jest ustaloną wartością progową, to wówczas P_e jest zwiększane w stosunku do wartości wynikającej ze wzoru (1) o pewien ustalony procent. Dzięki temu układ energicznie działając w okresie szczytowej mocy całkowitej P_e może zgromadzić większą ilość energii E w akumulatorze i w ten sposób może przedłużyć swoją egzystencję.

2. Opis elementów modelu

Omówimy teraz realizację poszczególnych podzespołów modelu układu samodzielnego i zasady ich współdziałania. Każdy z N sygnałów wejściowych S_1, S_2, \dots, S_N , docierających w rozważanym momencie czasu do receptorów układu, zamieniany jest przez receptor na sygnał receptorowy REC zgodnie z zależnością:

$$\text{REC} = \begin{cases} 0 & \text{gdy } S_i < S_{i,pr} \\ K_i S_i & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie K_i oraz $S_{i,pr}$ są parametrami odpowiadającymi współczynnikowi wzmocnienia i -tego receptora i jego strefie nieczułości. W oryginalnej koncepcji podanej w pracy [1] sygnały wyjściowe z receptorów doprowadzane były do wejść tzw. korelatora, w którym następowało wypracowywanie sygnałów wyjściowych, tzw. potencjałów estymacyjnych, będących podstawą działania efektora. Zakładało się przy tym, że pobudzenie i -tego wejścia korelatora wyraża się wzorem:

$$V_{r_i} = \text{REC}_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N G_{ik} V_{r_k} + V_h, \quad (4)$$

gdzie V_{r_i} jest sygnałem pobudzającym i -te wejście, G_{ik} — współczynnikiem określającym stopień sprzężenia i -tego i k -tego wejścia korelatora, V_h było sygnałem pochodzącym od homeostatu. Próby modelowe wykazały, że model taki był wystarczający w przypadku, kiedy układ odbierał niewiele (1–3) niezbyt silnych bodźców zewnętrznych. W przypadku pobudzenia większej liczby receptorów układ stawał się niestabilny z uwagi na powiązania pomiędzy wejściami, mające charakter wielokierunkowych sprzężeń zwrotnych dodatnich. Zaszła potrzeba zdekomponowania korelatora na dwa układy, tak jak to pokazano na rysunku 1. W takim modelu korelatora obowiązuje zależność:

$$V_{r_i} = \text{REC}_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N G_{rik} \text{REC}_k + V_h. \quad (5)$$

Druga część korelatora określa wielkość sygnału wyjściowego, kierowanego do efektorów układu. Działanie tej części można opisać równaniem macierzowym:

$$\begin{bmatrix} V_e \\ V_p \end{bmatrix} = [G] \begin{bmatrix} V_r \\ V_h \end{bmatrix}, \quad (6)$$

gdzie V_T oznacza wektor sygnałów pobudzających $V_r^T = \langle V_{r_1}, V_{r_2}, \dots, V_{r_N} \rangle$, V_e — wektor sygnałów idących do elementów wykonawczych (efektorów), $V_e^T = \langle V_{e_1}, V_{e_2}, \dots, V_{e_M} \rangle$, natomiast V_h i V_p są odpowiednio sygnałami od i do homeostatu (p. rys. 1). Macierz G określa siłę związku pomiędzy poszczególnymi wejściami i wyjściami korelatora. Jej współczynniki są zmienne w czasie i zależą od doświadczenia układu. Jest to jeden z powodów, dzięki którym układ uczy się poprawnych reakcji. Przyjęto, zgodnie z pracą [1], że zmienność współczynnika G_{ik} odbywa się zgodnie z zależnością:

$$G_{ik} = \begin{cases} G_{gik} - (G_{gik} - G_{pik})e^{-\varepsilon_r t} & \text{gdy } V_{r_i} \neq 0, \\ G_{oik} + G_{pik} - G_{oik}e^{-\varepsilon_d t} & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (7)$$

gdzie t oznacza czas mierzony od chwili zaistnienia warunku $V_{r_i} \neq 0$ lub $V_{r_i} = 0$ odpowiednio dla górnej i dolnej części wzoru, G_{gik} jest graniczną wielkością wzrostu G_{ik} , G_{oik} jest minimalną wartością narzuconą dla G_{ik} , natomiast G_{pik} jest wartością parametru G_{ik} w chwili, kiedy warunek $V_{r_i} \neq 0$ zmienił się na $V_{r_i} = 0$ lub na odwrót. Wartość G_{gik} jest zależna od wielkości sygnału wejściowego:

$$G_{gik} = \frac{G_{oik}}{1 - a_{ik} V_{r_i} G_{oik}}, \quad (8)$$

gdzie a_{ik} jest ustaloną stałą, osobną dla każdego wejścia. Od wielkości sygnału wejściowego zależny jest także współczynnik ε_r występujący w wykładniku eksponenty pierwszej części wzoru:

$$\varepsilon_{rik} = \ln(a_{ik} V_{r_i} G_{oik}). \quad (9)$$

Przyjęcie podanych wyżej zależności dla G_{gik} oraz ε_{rik} spowodowało jednak powstanie silnego dodatniego sprzężenia zwrotnego między G_{gik} a V_{r_i} , co wraz z istnieniem omówionych wyżej sprzężeń pomiędzy wejściami korelatora doprowadziło do niestabilności układu. Zaszła potrzeba wprowadzenia dodatkowych ograniczeń na wzrost G_g i ε_r ; ograniczenia te w modelu przyjęto w postaci:

$$G_{gik} \leq G_{\max} \varepsilon_{rik} \leq \varepsilon_{\max}. \quad (10)$$

Działanie homeostatu sprowadza się do wprowadzenia do korelatora dodatkowego sygnału V_h , obliczonego na podstawie dostarczonej w danym kroku mocy zewnętrznej P_e (miara korzystności reakcji), ilości energii zgromadzonej w akumulatorze E oraz sygnału V_p z korelatora:

$$V_h = dP_e E - \frac{b}{c} V_p. \quad (11)$$

Współczynniki d i b są tu stałymi, natomiast c oznacza tzw. współczynnik rozbudowy układu. Współczynnik c zgodnie z sugestiami pracy [1] przyjęto jako zmienny (ograniczanie rozbudowy), jednak eksperymenty wykazały, że ograniczanie rozbudowy nie zachodziło (nie leżało w interesie układu samodzielnego).

Wielkości wyjściowe z korelatora podawane były na wejścia układów określających reakcje układu, przy czym reakcja była wykonywana, jeśli sygnał V_{e_i} na i -tym wyjściu korelatora przewyższał zadany próg V_{ed_i} . Wielkość reakcji na i -tym wyjściu określa zależność:

$$R_i = p_i P_k, \quad (12)$$

gdzie p_i jest stałym współczynnikiem zależnym tylko od rodzaju reakcji (numeru wyjścia), natomiast P_k jest nadwyżką mocy, jaką w danej chwili układ dysponuje. Wielkość ta może być obliczona jako różnica pomiędzy mocą całkowitą P_c a mocą „asekuracyjną” P_s [1].

$$P_k = P_c - P_s. \quad (13)$$

W modelu przyjęto zgodnie z rozważaniami zawartymi w [1], że moc całkowita P_c zależna jest od ilości tworzywa wchodzącego w skład struktury układu samodzielnego C oraz od jakości tego tworzywa F . Zależność tę wyraża wzór

$$P_c = k C F, \quad (14)$$

gdzie k jest współczynnikiem określającym zdolność układu do przetwarzania energii. Ze względu na rozbudowę układu („rośnięcie”) ilość tworzywa C wzrasta w czasie:

$$C = C_g(1 - e^{-ct}), \quad (15)$$

gdzie C_g jest graniczną ilością tworzywa, a c jest wymienianym już wyżej współczynnikiem rozbudowy. Równocześnie jednak jakość tworzywa ulega stałej degradacji

$$F = F_0 e^{-ft}, \quad (16)$$

gdzie f jest także pewną stałą. W wyniku obydwu tych procesów moc P_c zmienia się zgodnie z dwuwykładniczym przebiegiem:

$$P_c = k F_0 C_g e^{-ft} (1 - e^{-ct}). \quad (17)$$

Moc asekuracyjna, o której wyżej była mowa, określana jest jako suma mocy strat P_0 i mocy potrzebnej na pobranie energii P_s z otoczenia P_r :

$$P_s = P_0 + P_r. \quad (18)$$

Przyjmuje się, że moc strat jest proporcjonalna do ilości substancji:

$$P_0 = w C, \quad (19)$$

a moc P_r stanowi stały ułamek mocy asekuracyjnej:

$$P_r = r P_s, \quad (20)$$

wówczas

$$P_s = \frac{P_0}{1-r}. \quad (21)$$

Zakłada się, że musi być spełniona nierówność

$$P_s \leq P_c, \quad (22)$$

jeśli nie jest ona spełniona, następuje kres egzystencji układu.

W interesie układu jest więc maksymalizacja P_k . Można przyjąć, że układ samodzielny powinien realizować sterowanie maksymalizujące wskaźnik jakości Q , wyrażający się wzorem:

$$Q = \int_0^{t_z} P_k(t) dt, \quad (23)$$

gdzie t_z oznacza czas życia układu. Teoretycznie (zgodnie z ustaleniami pracy [1]) kryterium to powinny lepiej realizować układy o powstrzymywanej rozbudowie, tj. układy, dla których współczynnik c maleje w czasie. Jednym z bardziej zaskakujących wyników uzyskanych w opisywanym tu eksperymencie symulacyjnego badania układów samodzielnych było wykazanie, że we wszystkich eksperymentach układy o powstrzymywanej rozbudowie miały gorsze wyniki niż układy funkcjonujące przy ustalonym c .

W wyniku oddziaływania układu samodzielnego na środowisko otrzymuje on ze środowiska moc zewnętrzną P_e , którą może zużytkować, jeśli spełniona jest zależność $P_e \leq P_c$; w przeciwnym przypadku wykorzystana może być jedynie część P_e , wynosząca P_c . Oznaczając przez P_i moc efektywnie pobraną przez układ z otoczenia, możemy opisać działanie akumulatora zależnością:

$$E(t+dt) = E(t) + P_i(t)dt - P_0(t)dt - P_k(t) \sum_{i=1}^M p_i \delta_i, \quad (24)$$

$$P_i(t) = \begin{cases} P_c(t) & \text{gdy } P_e(t) < P_c(t). \\ P_e(t) & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases}$$

Przez dt oznaczono tu krok dyskretyzacji czasowej, a δ_i jest funkcją przyjmującą wartość 1, jeśli i -ta reakcja została wykonana, oraz wartość 0 dla tych i , które odpowiadają nieczynnym efektorom. Współczynnik r we wzorze (20) określamy jest na każdym kroku symulacji jako równy

$$r = \begin{cases} \frac{P_0}{P_c} & \text{gdy } P_e > P_0. \\ \frac{P_0}{E} & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases} \quad (25)$$

3. Wyniki badań

Opisane wyżej równości i nierówności stanowiły podstawę przy modelowaniu systemu: układ samodzielny + środowisko. Dokonano kilkudziesięciu eksperymentów symulacyjnych, badając następujące zagadnienia:

- 1) zgodność zachowania się modelu symulacyjnego układu samodzielnego z informacjami zawartymi w pracy [1];
- 2) wpływ charakterystyk środowiska na zachowanie się modelu symulacyjnego układu samodzielnego;
- 3) wpływ apriorycznej („dziedzicznej”) informacji na zachowanie się układu samodzielnego;
- 4) wpływ wartości poszczególnych parametrów występujących w modelu na zachowanie się układu samodzielnego.

W niniejszej pracy przytoczone zostaną jedynie najciekawsze wnioski uzyskane w wyniku symulacji; ewentualne wyniki szczegółowe znaleźć można w pracy [3]. Odnośnie do punktu 1) stwierdzono dużą zgodność wyników uzyskiwanych w toku symulacji z teoretycznymi przewidywaniami podanymi w pracy [1], jakkolwiek zaszła potrzeba zmodyfikowania kilku drobnych szczegółów struktury układu w stosunku do opisanego w tejże pracy. Najważniejsze zmiany zasygnalizowano przy omawianiu struktury korelatora, którego budowa jest nieco odmienna od opisanej w literaturze; w toku eksperymentów wprowadzono także dodatkową zmianę polegającą na uzależnieniu szybkości deregistracji śladu pamięciowego w korelatorze (G_{ik} , p. wzór (7)) w zależności od tego, czy reakcja wykonana przez układ okazała się korzystna, czy nie. W przypadku reakcji niekorzystnych (prowadzących do zmniejszenia P_e) zmniejszone zostają wartości funkcji przejścia pomiędzy pobudzonymi w danym kroku wejściami V_e , a pobudzonymi (czynnymi) w danym kroku wyjściami V_e ; równocześnie wzrastają wartości funkcji przejścia pomiędzy tymi samymi wejściami V_e , a wyjściem sygnałowym do homeostatu V_p . Bardzo istotną, a już odnotowaną rozbieżnością pomiędzy danymi literaturowymi a uzyskanymi z modelu, był brak tendencji układu do ograniczania swojej rozbudowy (układ na każdym kroku miał możliwość ograniczenia rozbudowy — zmniejszenia współczynnika c , jeśli leżało to w jego interesie, tj. jeśli pozwalało zmniejszyć wartość kryterium Q ; testowane układy nigdy z tej możliwości nie korzystały).

Analiza tych samych układów samodzielnych w środowiskach o różnych właściwościach wykazała, że korzystny jest pewien stopień zdeterminowania środowiska. W środowisku czysto przypadkowym układ samodzielny nie miał szans na polepszenie warunków swojej egzystencji drogą celowego oddziaływania na środowisko i dlatego zwykle utrzymywał swoje reakcje na pewnym ustalonym poziomie, gdyż takie postępowanie nie groziło pogorszeniem sytuacji. Układ w takim całkowicie przypadkowym środowisku egzystował zwykle dość krótko, gdyż na skutek wykonania nieprawidłowej reakcji doprowadzał do gwałtownego wzrostu wartości P_e , przy równoczesnym zmaleniu P_e , i ginął na długo przed teoretycznym okresem kresu egzystencji. W miarę jak środowisko stawało się bardziej zdeterminowane,

układ samodzielny przystosowywał się do niego i mógł znacznie wydłużyć swoją egzystencję. Niekorzystne wpływy środowiska szczególnie dotkliwie dawały się odczuć w początkowym okresie egzystencji układu, kiedy to reakcje układu są nieliczne i słabe z powodu małej mocy P_k oraz małych wartości transmitancji korelatora. Jedną z dróg polepszania sytuacji układu w tym okresie było obniżanie progowych wartości powodujących reakcję V_{ed} (duża impulsywność układu w młodym wieku), konieczne jednak było, aby w miarę nabierania doświadczenia układ zwiększał wartość V_{ed} , gdyż inaczej groziło to niestabilnością. Innym sposobem było zabezpieczanie układowi w początkowym okresie jego egzystencji pewnego minimum P_e , niezależnie od jego reakcji („opieka nad dzieckiem”). Przy braku tych środków ochronnych często zdarzało się, że młody układ ginął zanim zdążył wykonać jakąkolwiek reakcję.

Ciekawe wyniki dał eksperyment polegający na wyposażaniu nowego układu w chwili jego kreacji w informację „dziedziczną”, polegającą na przekazaniu nowemu układowi zawartości korelatora układu „rodzicielskiego”. Układy w ten sposób kreowane zachowywały z pokolenia na pokolenie znaczne podobieństwo zachowań i reakcji i jakkolwiek miały znacznie większe szanse na osiągnięcie długiego czasu egzystencji, to jednak ich zindywidualizowanie było bardzo niewielkie. W szczególności nie obserwowano procesu doskonalenia z pokolenia na pokolenie („rozwój gatunku”).

Podsumowanie

W cyklu eksperymentów symulacyjnych, w których nadawano poszczególnym parametrom układu samodzielnego różne wartości wykazano, że właściwości układu zależą w bardzo istotny sposób od praktycznie wszystkich parametrów, a zachowanie układu przy jednym zestawie parametrów może być zupełnie niepodobne do zachowania tego samego układu przy innych parametrach. Szczególnie istotny jest wybór parametrów $G_{o_{ik}}$, a_{ik} , $\varepsilon_{r_{ik}}$, c i f , a także (w omówionym wyżej sensie) V_{ed} . Wydaje się, że przez odpowiedni dobór tych parametrów możliwe jest dopasowywanie właściwości modelowego układu samodzielnego do pewnych konkretnych układów samodzielných, istniejących w rzeczywistości (np. określonych zwierząt).

Przebieg poszczególnych parametrów charakteryzujących przebieg egzystencji jednego z symulowanych układów samodzielných można prześledzić na przykładowym wydruku z maszyny cyfrowej. Przebiegi te są typowe dla większości „seansów” symulacyjnych, przeprowadzonych z układem samodzielnym.

Dalsze prace prowadzone obecnie zmierzają do określenia właściwości zespołu układów samodzielných działających w tym samym środowisku. Wstępne wyniki, uzyskane z badania dwu układów wykazały, że pojawiają się elementy współdziałania układów przez środowisko, a nie zjawiska typu rywalizacji czy walki, chociaż eksperyment dopuszczał takie zjawiska.