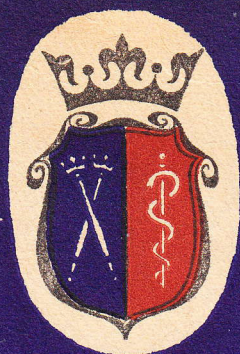


AKADEMIA MEDYCZNA



im. M. Kopernika w Krakowie

**MODELOWANIE CYBERNETYCZNE
SYSTEMÓW BIOLOGICZNYCH**

Materiały z konferencji naukowej 16–17. V. 1979 r.

KRAKÓW 1979

Andrzej Migacz, Ryszard Tadeusiewicz

MODEL RODZINY PSZCZELEJ

Przedmiotem modelowania cybernetycznego zazwyczaj są wybrane fragmenty systemów biologicznych (poszczególne narządy, organy i mechanizmy) w dalszej kolejności większe systemy złożone z elementów wymienionego rodzaju, w końcu zachowania osobników i ich interakcja z otoczeniem. W zeszycie, w skład którego wchodzi niniejsze opracowanie, nie brak przykładów tego typu modeli. Niniejszy artykuł poświęcony jest modelowi o większej skali, przedstawiającemu system złożony z wielkiej liczby osobników połączonych zależnościami typu społecznego, a konkretnie modelowi wymienionej w tytule rodziny pszczelej.

Rozważany system funkcjonuje w powiązaniu ze środowiskiem, z którego pobiera niezbędne do życia produkty, podlegając równocześnie zakłócającym oddziaływaniom zlokalizowanych w środowisku typu temperatury, opadów i warunków fenologicznych, w związku z czym model komputerowy rozważanego systemu musi zawierać także element symulacji środowiska.

Po tych wstępnych uwagach przystąpimy do skrótowego przedstawienia struktury modelu i jego poszczególnych elementów. Dokładne dane na temat budowy modelu i jego funkcjonowania znaleźć można w pracy [1], zasady tworzenia modelu i jego identyfikacji przedstawiono w pracy [2] i częściowo w [3], natomiast w pracy [4] przedstawiono praktyczne wyniki uzyskane przy wykorzystaniu modelu do zagadnień optymalizacji gospodarki pszczelar-skiej. Na wstępie poczynić trzeba jednak kilka spostrzeżeń, które pozwolą Czytelnikowi zorientować się w stopniu złożoności rozważanego modelu i usprawiedliwią dalsze skrót. Program symulujący zachowanie się modelu napisano w FORTRANIE celem optymalizacji jego struktury z wykorzystaniem osiągnięć programowania strukturalnego. (Szeroko znane języki wyspecjali-zowane służące do modelowania systemów dynamicznych nie dają takiej możli-wości). Mimo to model liczy 29 segmentów FORTRANOWSKICH zawierających od 10 do 50 instrukcji każdy. W modelu wyróżnić można 10 zasadniczych modu-łów. Dziewięć z nich, obejmujących funkcjonowanie samego obiektu, przed-stawiono na rysunku 1, dziesiątym jest model środowiska. Odpowiadający temu schematowi diagram powiązań zasadniczych modułów programowych przed-

stawiono na rysunku 2. Model jest synchroniczny z przyjętym krokiem dyskretyzacji czasu wynoszącym jedną dobę.

Podstawowym modułem modelu jest blok symulujący zjawiska rozrodu, dojrzewania i wymierania owadów. W bloku tym na skutek działania generatora rozwoju, jakim jest matka pszczoła codziennie pojawia się pewna liczba jaj ΔY obliczana ze wzoru:

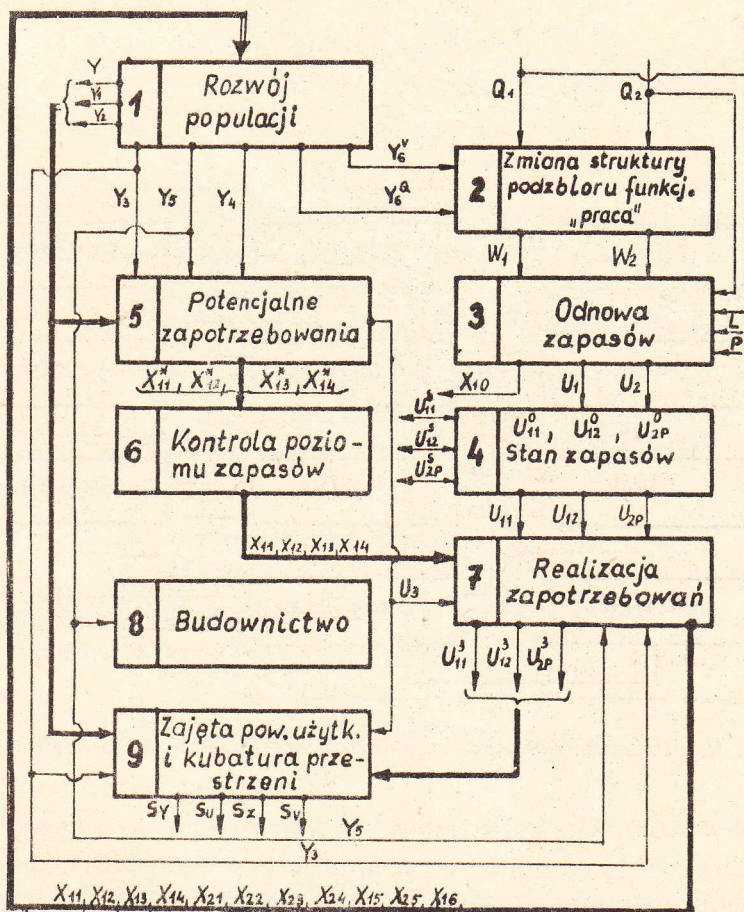
$$\Delta Y(k) = \left[A \frac{\sum_{i=1}^k x_{13}(i)}{k-9} + C \right] \cdot b(k) \quad (1)$$

gdzie:

- A i C - określają cechy genetyczne matki,
- k - jest numerem bieżącego dnia (numer kroku modelowania),
- x_{13} - oznacza odpowiednie spożycie nadmiarowe (patrz dalej),
- b(k) - jest współczynnikiem wagowym uwzględniającym niestacjonarności ograniczenia i indywidualną wydolność biologiczną matki:

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

Oznaczenia użyte w tym wzorze będą dalej wyjaśnione jedynie K_{kryt} oznacza genetycznie uwarunkowaną długość okresu dynamicznego rozwoju rodziny pszczołej z uwzględnieniem rocznego cyklu rozwoju biologicznego. Złożone jaja przechodzą kolejne fazy rozwoju, w wyniku czego na każdym kroku k mamy $y(k)$ embrionów, $y_1(k)$ larw, $y_2(k)$ poczwarek i $y_3(k)$ owadów całkowicie ukształtowanych (przedstawiamy to tutaj w uproszczeniu, w modelu dyskutowano bardziej subtelne rozróżnienia np. larwa zwinięta, wyprostowana itd.). Wymienione wyżej wartości obliczane są dla dużych k ze wzorów:



Ryc. 1. Struktura wewnętrzna systemu

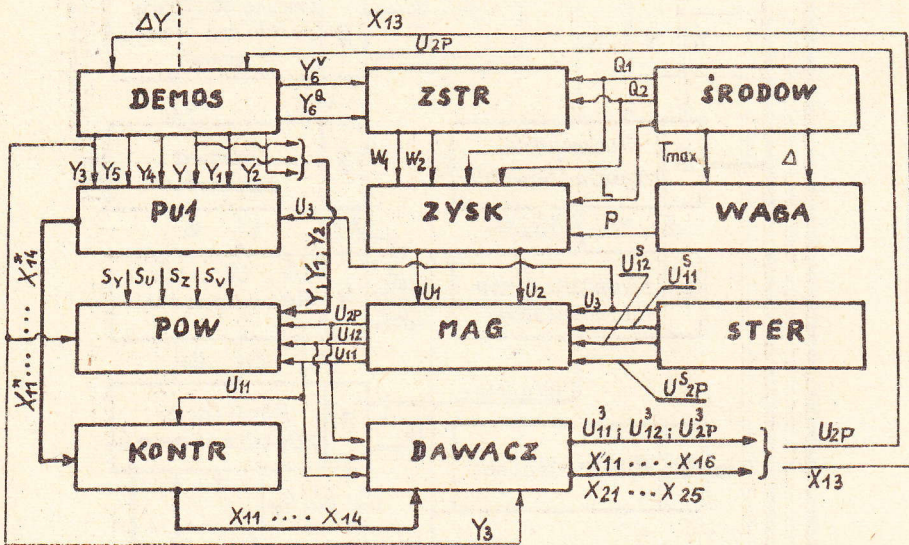
$$y(k) = \sum_{i=k-2}^k \Delta Y(i) \quad \Delta y_1(k) = \Delta Y(k-3)$$

$$y_1(k) = \sum_{i=k-5}^k \Delta y_1(i) \quad \Delta y_2(k) = \Delta y_1(k-6)$$

$$y_2(k) = \sum_{i=k-11}^k \Delta y_2(i) \quad \Delta y_3(k) = \Delta y_2(k-12)$$

$$y_3(k) = \sum_{i=k-34}^k \Delta y_3(i)$$

(3)



Ryc. 2. Diagram powiązań zasadniczych modułów programowych

Dla małych k odpowiadających początkowi okresu rocznego rozwoju rodziny pszczelej wszystkie omawiane wzory komplikują się na skutek konieczności uwzględnienia warunków początkowych pochodzących od owadów populacji zimowej.

Zbiór owadów y_3 nie jest jednorodny. W zależności od wieku owady pełnią w rodzinie różne funkcje biologiczne, co w modelu musiało być uwzględnione, gdyż liczba owadów pełniących określone zadania limituje efektywność realizacji tych zadań (np. zbieranie nektaru i pyłku).

W modelu wyróżniono zbiory y_4 (pszczoły młode, dziesięciodniowe, pełniące rolę karmicielek w procesie reprodukcji), y_5 - (pszczoły w wieku od 10 do 20 dni, które wydzielają wosk i mogą być wykorzystane do budowy plastrów) i y_6 (pszczoły zbieraczki, z których w normalnych warunkach około 80% zbiera nektar, a 20% - pyłek). Naturalnie zachodzi zawsze związek:

$$y_3(k) = y_4(k) + y_5(k) + y_6^Q(k) + y_6^V(k) \quad (4)$$

gdzie:

y_6^Q - oznacza podzbiór pszczół zbierających na danym kroku nektar i spadź,

y_6^V - podzbiór zbierający pyłek.

Podział zbioru y_3 nie zachodzi na bazie sztywnych reguł opartych jedynie na strukturze wiekowej populacji, lecz uwarunkowany jest okolicznościami. Przykładowo w warunkach, kiedy w środowisku występuje niedobór określonego pożytku (np. pyłku) odpowiedni zbiór funkcjonalny w populacji zostaje zredukowany na korzyść innych zbiorów. Wydzielenie podzbiorów y_4 i y_5 ma bardziej zdecydowany charakter, gdyż określone możliwości biologiczne występują jedynie u owadów w określonej grupie wiekowej (gruczoły woskowe czy produkcja mleczka pszczelego).

Obok reprodukcji zasadniczą funkcją warunkującą przetrwanie modelowanego obiektu jest pozyskiwanie ze środowiska nektaru spadzi i pyłku. Pozyskiwanie nektaru opisuje równanie:

$$U_1(k) = c_1 l(k) p(k) y_6^Q(k) \quad (5)$$

gdzie:

c_1 - jest stałą,

$l(k)$ - liczba lotów wykonanych średnio przez jedną pszczołę,

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

Parametry $l(k)$ i $p(k)$ uzależnione są od stanu środowiska: w modelu są one funkcją temperatury, wielkości opadu i topografii dostępnych pożytków, przy czym czynniki te są wprowadzane do modelu z zewnątrz co daje możliwość badania wpływu warunków meteorologicznych i fenologicznych na gospodarkę oraz pozwala na dopasowanie warunków symulacji do konkretnego sezonu i konkretnego terenu. Podobnie dla pyłku stosowane było równanie:

$$U_2(k) = c_2 l(k) p(k) y_6^V(k) \quad (6)$$

Pozyskanie nektaru w ilości $U_1(k)$ i pyłku w ilości $U_2(k)$ na kroku k (wykonywanie lotów) odbywa się kosztem zwiększonego spożycia zapasów. Spożycie to obliczane było ze wzoru:

$$X_{10}(k) = c_3 l(k) p(k) [y_6^Q(k) + y_6^V(k)] \quad (7)$$

Wartości $U_1(k)$ i $U_2(k)$ mogły być w modelu dodatkowo ograniczane przez środowisko w warunkach, kiedy ilość odpowiedniego produktu w środowisku była mniejsza niż potencjalne możliwości zbierackie $U_1(k)$ rozważanej rodziny pszczołej. W tym celu środowisko generowało na każdym kroku funkcje $q_1(k)$ i $q_2(k)$ określające jego bieżącą zasobność i w przypadku kiedy $U_1(k) > q_1(k)$ przyjmowano $U_1(k) = q_1(k)$ przy czym $i=1,2$. Fakt ograniczonych zasobów środowiska nie wpływał jednak na spożycie związane z wykonywaniem lotów zwiadowczych $X_{10}(k)$, przeto w warunkach braku pożytków i dobrej pogody obserwowano znany z praktyki fakt "wynoszenia zapasów". Prze-trwanie systemu w tych warunkach możliwe było pod warunkiem istnienia tych zapasów, dlatego funkcja magazynowa odgrywała w modelu poczesną rolę. Miód gromadzony jest w postaci niezasklepionej w ilości $U_{11}(k)$ i za-sklepionej $U_{12}(k)$, natomiast pyłek w postaci pierzgi $U_{2P}(k)$. Na stan tych zapasów mają także wpływ spożycia omówione dalej oraz działalność czło-wieka, który może dodawać lub odejmować odpowiednie ilości poszczególnych produktów, oznaczane w modelu przez $U_{11}^S(k)$ i $U_{12}^S(k)$, a także niekiedy $U_{2P}^S(k)$. W modelu zabiegi człowieka symulowane były przez blok sterowania w oparciu o podane na początku modelowania parametry. Bilans zapasów opi-sywany jest prostymi równaniami:

$$\begin{aligned} U_{11}(k) &= U_{11}(k-1) + U_1(k) + U_{11}^S(k) \\ U_{12}(k) &= U_{12}(k-1) + U_{12}^S(k) \\ U_{2P}(k) &= U_{2P}(k-1) + U_2(k) + U_{2P}^S(k) \end{aligned} \quad (8)$$

Naturalnie część zgromadzonych zapasów ulega spożyciu, przy czym pro-ces ten w modelu obsługują aż trzy bloki. Pierwszy z nich określa zapo-trzebowania. Wyróżniono cztery grupy potencjalnych potrzeb: $X_{11}^*(k)$ - ozna-cza potrzeby na podtrzymanie funkcji życiowych całej rodziny, $X_{12}^*(k)$ - oznacza produkt potrzebny do zapewnienia prawidłowego rozwoju larw w dru-gim stadium, X_{13}^* - nadmiarowe spożycie związane z karmieniem i pielęgnacją larw, X_{14}^* - nadmiarowe spożycie związane z funkcją budowania plastrów i wy-twarzania wosku. Potrzeby obliczane były ze wzorów:

$$\begin{aligned}
 X_{11}^x(k) &= c_4 y_3(k); \\
 X_{12}^x(k) &= c_5 y_1(k); \\
 X_{13}^x(k) &= c_6 y_4(k) \text{ gdy } y_1(k) + y(k) > 0 \\
 X_{14}^x(k) &= c_7 y_5(k) \text{ gdy } U_3(k) > 0
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

W zaspokajaniu obliczonych potrzeb obowiązuje system priorytetów, dzięki któremu ważniejsze życiowo potrzeby zaspokajane są w pierwszej kolejności w przypadku kiedy nie ma możliwości zaspokojenia wszystkich potrzeb. Realizuje to blok modelu kontrolujący stosunek potrzeb do zapasów. Wyróżniane są trzy przypadki:

$$\begin{aligned}
 1) \quad U_{11}(k) &\geq \sum_{j=1}^4 X_{1j}^x(k) \\
 2) \quad X_{11}^x(k) + X_{12}^x(k) &\leq U_{11}(k) \leq \sum_{j=1}^4 X_{1j}^x(k) \\
 3) \quad U_{11}(k) &< X_{11}^x(k) + X_{12}^x(k)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

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

$$X_{1j}(k) = X_{1j}^x(k) ; \quad j=1, \dots, 4 \tag{11}$$

W przypadku drugim zaspokajane są spożycia priorytetowe:

$$X_{11}^x(k) = X_{11}^x(k) \quad \text{i} \quad X_{12}^x(k) = X_{12}^x(k) \tag{12}$$

natomiast pozostałe spożycia są uszczuplane:

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

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

W przypadku trzecim przyjmuje się $X_{11}(k) = X_{11}^*(k)$, $X_{12}(k) = X_{12}^*(k)$, $X_{13}(k) = X_{14}(k) = 0$. Po ustaleniu i skorygowaniu spożycia następuje uwzględnienie spożycia w modelu zapasów. Spożycia pyłku oblicza się z zależności:

$$X_{21}(k) = c_8 X_{11}(k); \quad X_{22}(k) = c_9 X_{12}(k) \quad (14)$$

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

Naturalnie spożycia te są realizowane o ile istnieje dla nich pokrycie w postaci odpowiednich zapasów $U_{2P}(k)$, w przeciwnym przypadku zostaje ograniczone do wartości wynikającej z zapasów drogą prostego obciążenia. Proces wydawania zapasów odbywa się dwuetapowo. W pierwszym etapie określone są pomocnicze wartości:

$$U_{2P}^1(k) = U_{2P}(k) - \sum_{j=1}^4 X_{2j}(k) \quad (15)$$

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

Dla dalszego przeżycia systemu konieczne są warunki $U_{2P}^1(k) > 0$ i $U_1^1(k) > 0$. Jeśli warunki te nie zachodzą dochodzi do zagłady systemu, chyba że pojawi się czynnik sterujący pochodzący od człowieka w postaci dodatniego U_{11}^s , U_{12}^s , U_{2P}^s lub nastąpią sprzyjające wziętkom warunki zewnętrzne. Jeśli podane warunki są spełnione istnieje możliwość wydatkowania pewnej liczby produktów na budowę plastrów.

Ilość ta obliczana jest ze wzorów:

$$X_{15}(k) = c_{10} U_3(k) \quad \text{oraz} \quad X_{25}(k) = c_{11} U_3(k) \quad (16)$$

o ile zasoby $U_1^1(k)$ i $U_{2P}^1(k)$ na to pozwalają. $U_3(k)$ oznacza tu ilość wytworzonego na k -tym kroku wosku, potrzebnego do zapewnienia rodzinie właściwej kubatury i użytkowej powierzchni plastrów pszczelich. Po wydaniu tych zapotrzebowań obliczane są nowe wartości bilansowe:

$$U_{11}^2(k) = U_{11}^1(k) - \sum_{i=1}^5 X_{1i}(k) \quad (17)$$

Jeśli wartość ta jest dodatnia, to oznacza, że na pokrycie zapotrzebowań rodziny wystarczył miód odsklepiony i że pewna jego ilość pozostała. Część z tej pozostałości w wyniku odpowiednich procesów przetwórczych zostanie zasklepiona przez pszczoły, a więc ostatecznie:

$$U_{11}(k) = U_{11}^2(k) - \Delta U_{12}(k) - X_{16}(k) \quad (18)$$

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

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 obliczane są ze wzorów:

$$\Delta U_{12}(k) = c_{12} U_{11}^2(k) \quad \text{oraz} \quad X_{16}(k) = c_{13} \Delta U_{12}(k) \quad (19)$$

Jeśli obliczona wartość $U_{11}^2(k)$ jest ujemna, to oznacza, że zaszła konieczność odsklepienia miodu. Wówczas:

$$U_{11}(k) = 0 \quad \text{zaś} \quad U_{12}(k) = U_{12}(k) + U_{11}^2(k) \quad (20)$$

We wszystkich przypadkach:

$$U_{2P}(k) = U_{2P}(k) - \sum_{j=1}^5 X_{2j}(k) \quad (21)$$

Wielkości $U_{11}(k)$, $U_{12}(k)$, $U_{2P}(k)$ wykorzystywane są następnie w kolejnym następnym ($k+1$) kroku modelowania.

Elementem domykającym model systemu jest model procesu budownictwa. W modelu przyjęto, że ilość wosku jaka może być wytworzona na etapie k wynosi:

$$U_3(k) = \left[\frac{\sum_{i=1}^{k-10} X_{13}(i)}{k-10+n} c_{14} + c_{15} \right] y_5(k) \quad (22)$$

Dla celów identyfikacji i weryfikacji modelu obliczane są w nim wielkości zagospodarowanej przez rodzinę powierzchni plastrów:

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

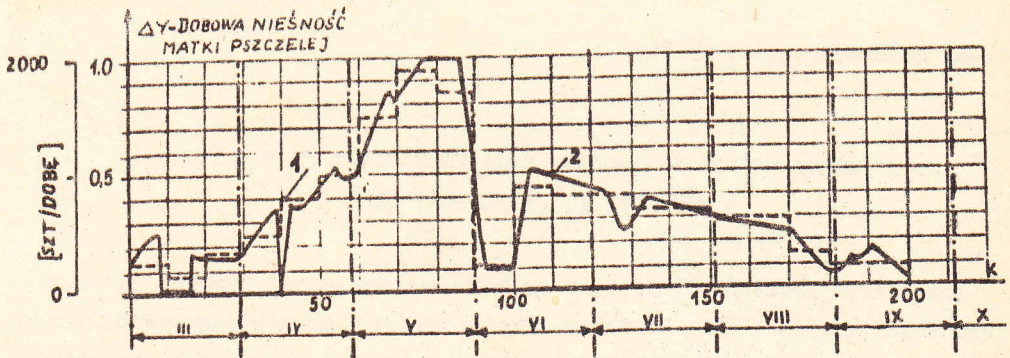
$$S_u(k) = c_{18} 2 U_{11}(k) + U_{12}(k) + 2 U_{2P}(k) \quad (23)$$

gdzie:

S_y - oznaczono obszary plastrów zajęte przez pośrednie formy rozwojowe pszczoły,

S_u - obszary zajęte przez zapasy.

Zasadniczą trudnością poza zaprogramowaniem modelu stanowiło oszacowanie wartości parametrów omówionych w modelu stałych (c_1, \dots, c_{18}). Wartości tych parametrów przyjmowano na podstawie danych literaturowych dotyczących gatunku *Apis mellifica* L., a także w oparciu o obserwacje i indywidualnie prowadzone eksperymenty identyfikacyjne. Prezentowany model można uznać za udany, gdyż wyniki symulacji stosunkowo wiernie odpowiadają przebiegom stosowanych wielkości w systemie rzeczywistym (rys. 3). Istotnym zadaniem jest więc obecnie jego wykorzystanie do celów gospodarczych i ekologicznych, co stanowi przedmiot aktualnie prowadzonych prac.



Ryc. 3. Przebiegi dolowej nieśności matki pszczelej (ΔY). 1 - według sprowadzonych do 10-dniowych; 2 - wyliczony w modelu za okres identyfikacji

L i t e r a t u r a

1. M i g a c z A., Cyfrowy model symulacyjny pewnego systemu biologicznego. Praca doktorska. AGH Kraków 1976.
2. M i g a c z A., T a d e u s i e w i c z R., Rodzina pszczela z komputera. Problemy nr 10 (379) 1977.
3. M i g a c z A., Metodyka identyfikacji i korzyści wynikające z modelowania złożonych systemów biologicznych. Problemy, nr 10(379) 1977.
4. T a d e u s i e w i c z R., Zasady stosowania elektronicznych maszyn cyfrowych do opracowywania rezultatów doświadczeń biologicznych. Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej nr 41/1976.