

Ryszard Arendt

Politechnika Gdańska

METODA MODELOWANIA SYMULACYJNEGO OBIEKTÓW O CHARAKTERZE CIĄGŁYM  
Z OPISEM MATEMATYCZNYM ZALEŻNYM OD DYSKRETNÝCH SYGNAŁÓW STERUJĄCYCHMODELING CONTINUOUS OBJECTS WITH A MATHEMATIC DESCRIPTION DEPENDING ON  
THE DISCRETE CONTROL SIGNALS BY THE SIMULATION METHODМЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ОБЪЕКТОВ, С МАТЕМАТИЧЕСКИМ  
ОПИСАНИЕМ ЗАВИСИМЫМ ОТ ДИСКРЕТНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ

**Streszczenie:** Przedstawiono zasady tworzenia modeli symulacyjnych obiektów sterowania binarnego o charakterze ciągłym. Określa się reżimy, tj. trwałe stany pracy obiektu oraz procesy przejściowe przy zmianie reżimu, które przedstawiane są w postaci liniowych stacjonarnych modeli. Tworzy się funkcje boolowskie o wartościach zależnych od dyskretnych sygnałów sterujących i wybranych parametrów obiektu, "identyfikujące" reżimy i procesy przejściowe. Podczas symulacji, w zależności od wartości binarnych sygnałów sterujących i wybranych parametrów obiektu wykorzystuje się odpowiedni model. Przy "przełączaniu" modeli zachowuje się wybrane zmienne stanu obiektu. Zaprezentowano przykładowy model wysokoprężnego silnika spalinowego jako obiektu sterowania binarnego.

**Summary:** The creation principles of simulation models of binary control objects with continuous character are presented. The regime (i.e. constant state of the object operation) and transient process of regime changes, are described as a linear time invariant models. The Boolean functions depending on binary control signals and chosen object parameters are created. These functions can "identify" regime and transient processes. During the simulation different models depending on binary control signal values and chosen object parameters are used. The chosen state variables of object are memorized while "switching" the models. An example of marine Diesel engine model as a binary control object is included.

**Резюме:** Рассматриваются принципы строения имитационных моделей непрерывных объектов бинарного управления. Определяются режимы т.е. состояния равновесия работы объекта и переходные процессы во время изменения режима, которые представляются в виде линейных стационарных моделей. Создаются логические функции зависящие от дискретных управляющих сигналов и избранных переменных объекта, "идентифицирующие" режимы и переходные процессы. Во время имитации, в зависимости от значений бинарных управляющих сигналов и избранных переменных используется соответствующая модель. Во время "переключения" моделей сохраняются избранные переменные состояния объекта. Представлена примерная модель судового двигателя внутреннего сгорания рассматриваемого как объект бинарного управления.

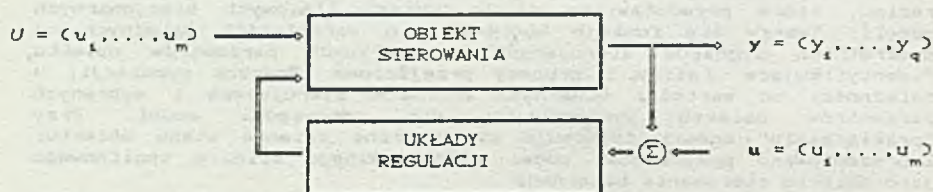
## 1. Wstęp

Badania symulacyjne są powszechnie stosowaną metodą wyboru struktury i określania poprawności pracy układów sterowania, które można przeprowadzić już w stadium projektowania. Podstawą badań symulacyjnych jest znajomość modeli matematycznych układów i obiektów sterowania. Model matematyczny powinien uwzględniać własności dynamiczne i statyczne podstawowych elementów, ich wzajemne powiązania oraz stany pracy niezbędne do badania układu regulacji i sterowania [6].

Przy prowadzeniu badań symulacyjnych występują problemy tworzenia modeli obiektów o charakterze ciągłym, które sterowane są sygnałami dyskretnymi, tzw. sterowanie binarne. W najprostszym przypadku (rys.1) dyskretne sterowanie dotyczy zmiany reżimu pracy obiektu. Układy regulacji utrzymują określone poziomy sygnałów wyjściowych dla danego reżimu pracy obiektu.

Przez reżim rozumie się trwały stan pracy obiektu, który można zmienić jedynie dyskretnymi sygnałami wejściowymi. W zakładzie produkcyjnym reżim pracy określa struktura zakładu, np. liczba czynnych stanowisk. W obiekcie sterowania binarnego, jakim jest silnik spalinowy, reżimami będą praca silnika i postój silnika.

Spotykane rozważania dotyczą zwykle zagadnień opisu obiektu jako układu regulacji, tj. opisu matematycznego wybranego reżimu pracy obiektu.



Rys.1. Binarne sterowanie obiektu w otwartym układzie  
Fig.1. Open loop binary control of the object

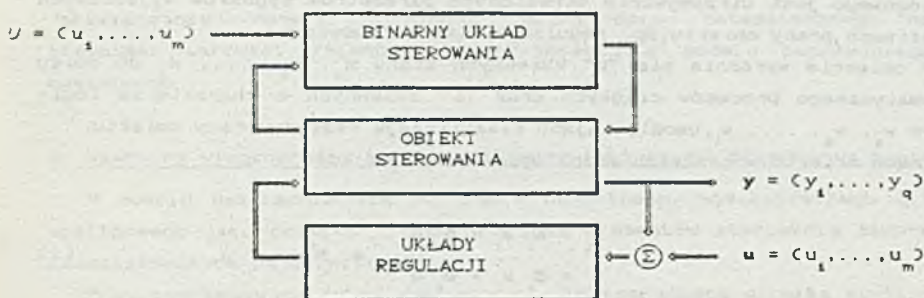
Zasadnicza funkcja sterowania binarnego dotyczy kontrolowanej zmiany reżimu obiektu, tj. przejścia obiektu z jednego trwałego stanu w drugi, przy zachowaniu określonych ograniczeń dotyczących sterowania, wynikających ze względów technologicznych, bezpieczeństwa i innych. W wielu przypadkach prowadzi się sterowanie w układzie otwartym, jak np.: rozruch, zatrzymanie turbiny generatora, rozpoczęcie lub zatrzymanie produkcji w zakładzie.

Przy automatyzacji sterowania binarnego (rys.2) zamykane są pętle sprzężenia zwrotnego wybranych sygnałów pracy obiektu (ciągłe sygnały poprzez progowe przetworniki A/C) z dyskretną częścią układu sterującego [4]. Ocena poprawności sterowania binarnego przy wykorzystaniu badań symulacyjnych wymaga utworzenia modelu obiektu sterowania, który opisuje różne jego stany pracy: stabilne, przejściowe oraz awaryjne.

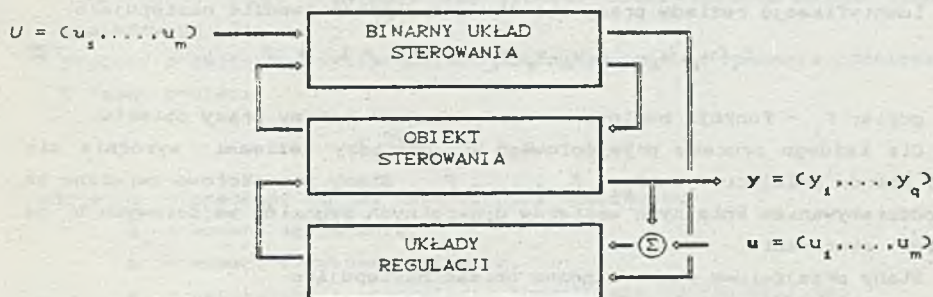
Spotykane są również układy sterowania binarnego, w których sygnały dyskretnie oddziałują na układy regulacji (rys.3), powodując zmianę ich struktury oraz nastaw [5].

Uwzględnienie zmian struktur i nastaw regulatorów przy modelowaniu symulacyjnym obiektu sterowania wymaga wyróżnienia podreżimów w danych reżimach pracy.

Poniżej rozważa się zasady tworzenia liniowych, stacjonarnych modeli symulacyjnych obiektów o charakterze ciągłym dla potrzeb sterowania binarnego. Przedstawiono przykład prostego modelu nawrotnego,



Rys.2. Binarne sterowanie obiektu w układzie zamkniętym.  
Fig.2. Closed loop binary control of the object



Rys.3. Binarne sterowanie obiektu w układzie zamkniętym z układami regulacji o przełączalnej strukturze  
Fig.3. Closed loop binary control of the object with switching structure of the control systems controllers

wysokoprężnego silnika spalinowego jako obiektu sterowania binarnego, który został wykorzystany przy badaniach symulacyjnych, prowadzących do wyszukania testów diagnostycznych dyskretnej części układu sterującego.

## 2. Opis matematyczny obiektu sterowania

Zakłada się, że na obiekt sterowania binarnego o charakterze ciągłym oddziałują "m" sygnałów dyskretnych  $u_1, u_2, \dots, u_m$ , tworzących wektor dyskretnych sygnałów wejściowych  $\mathcal{U}$  oraz "n" sygnałów analogowych  $u_1, u_2, \dots, u_n$ , tworzących wektor analogowych sygnałów wejściowych  $u$ . Obiekt posiada "S" trwałych reżimów pracy  $S_1, S_2, \dots, S_S$  i generuje "q" sygnałów wyjściowych  $y_1, y_2, \dots, y_q$ .

Zadaniem sterowania binarnego jest kontrolowane przeprowadzenie obiektu między wybranymi reżimami pracy. Dla uproszczenia dalszych rozważań przyjmuje się, że sterowanie binarne dotyczy kontrolowania "P" procesów przejściowych między reżimami pracy  $P_1, P_2, \dots, P_p$ . Zadaniem sterowania

analogowego jest utrzymywanie określonych parametrów sygnałów wyjściowych w reżimach pracy obiektu, np. regulacja stałowartościowa.

W obiekcie wyróżnia się "r" zmiennych stanu  $x_1, x_2, \dots, x_r$  do opisu matematycznego procesów ciągłych oraz "l" zmiennych o charakterze logicznym  $w_1, w_2, \dots, w_l$ , umożliwiające klasyfikację reżimów pracy obiektu.

Pracę obiektu w reżimach można opisać następująco:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + B_i u_i \\ y_i &= C_i x_i + D_i u_i \end{aligned} \rightarrow M_i^S \quad (1)$$

gdzie:  $i \in \{1, 2, \dots, r\}$ ,  $A, B, C, D$  - macierze parametrów.

Opis matematyczny (1) pracy obiektu w reżimie "i" tworzy model matematyczny  $M_i^S$ .

Identyfikację reżimów pracy obiektu można przeprowadzić następująco:

$$f_i(u_1, u_2, \dots, u_m, w_1, w_2, \dots, w_l) = 1 \rightarrow S_i \quad (2)$$

gdzie:  $f_i$  - funkcja boolowska identyfikująca reżimy pracy obiektu.

Dla każdego procesu przejściowego  $P_p$  pomiędzy reżimami wyróżnia się "J" stanów przejściowych  $P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pj}$ . Stany przejściowe związane są z oddziaływaniem kolejnych wektorów dyskretnych sygnałów wejściowych  $u_j$  na obiekt sterowania.

Stany przejściowe obiektu można opisać następująco:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{pj} &= A_{pj} x_{pj} + B_{pj} u_{pj} \\ y_{pj} &= C_{pj} x_{pj} + D_{pj} u_{pj} \end{aligned} \rightarrow M_{pj}^P \quad (3)$$

gdzie:  $p \in \{1, 2, \dots, P\}$  - indeks określający proces przejściowy  $P_p$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, J\}$  - indeks określający kolejny stan przejściowy procesu. Zależność (3) tworzy modele matematyczne  $M_{pj}^P$  procesu przejściowego  $P_p$ .

Identyfikację stanów procesu przejściowego można przeprowadzić następująco:

$$g_j(u_1, u_2, \dots, u_m, w_1, w_2, \dots, w_l) = 1 \rightarrow P_{pj} \quad (4)$$

gdzie:  $g_j$  - funkcja boolowska identyfikująca stany przejściowe obiektu.

Model symulacyjny obiektu sterowania binarnego tworzą zbiory modeli opisujące reżimy pracy obiektu ( $M_i^S$ ) oraz zbiory modeli matematycznych procesów przejściowych ( $M_{pj}^P$ ).  $M_p^P = \langle M_{p1}^P, M_{p2}^P, \dots, M_{pj}^P \rangle$ .

Funkcjom boolowskim (2) i (4) przypisuje się zestawione modele reżimów pracy obiektu (1) oraz stanów przejściowych obiektu (3).

$$\begin{aligned} f_i(u_1, u_2, \dots, u_m, w_1, w_2, \dots, w_l) = 1 &\rightarrow S_i \rightarrow i \rightarrow M_i^S \\ g_j(u_1, u_2, \dots, u_m, w_1, w_2, \dots, w_l) = 1 &\rightarrow P_{pj} \rightarrow pj \rightarrow M_{pj}^P \end{aligned} \quad (5)$$

W czasie symulacji zależnie od sterowania binarnego następuje "przełączanie" modeli. W chwili zmiany opisu matematycznego należy przenieść wartości zmiennych stanu obiektu z modelu poprzedniego do następnego.

### 3. Nawrotny wysokoprężny silnik spalinowy jako obiekt sterowania binarnego

W modelu uwzględnia się działanie nawrotnego, wysokoprężnego silnika spalinowego jako obiektu sterowania oraz elementów sterowania binarnego, zainstalowanych na silniku [2].

Przy tworzeniu opisu matematycznego wysokoprężnego silnika spalinowego przyjęto następujące założenia:

- model matematyczny silnika opisuje własności silnika jako obiektu sterowania i regulacji prędkości katowej;
- dla reżimu pracy przyjmuje się liniowy model wysokoprężnego silnika spalinowego [3];
- procesy przejściowe wystarczająco dokładnie opisuje równanie różniczkowe I rzędu postaci:

$$T \frac{d\omega}{dt} + k_t \omega = m_1 - m_0 \quad (6)$$

gdzie:  $\omega$  - prędkość katowa wału silnika spalinowego,

$m_0$  - moment obciążenia,

$m_1$  - moment indykowany silnika,

$k_t$  - współczynnik wzmocnienia momentu sił tarcia silnika,

$T$  - stała rozbiegu,

$t$  - czas;

- prędkości katowej wału silnika przy pracy naprzód, przypisana jest dodatnia wartość zmiennej, a przy pracy wstecz ujemna,
- opis matematyczny działania silnika jako obiektu sterowania można przedstawić w postaci przyjętego modelu dla reżimu pracy i zbioru rozwiązań równania różniczkowego (6) dla procesów przejściowych.

W nawrotnym wysokoprężnym silniku spalinowym można wyróżnić następujące binarne sygnały sterujące:

$u_1$  - otwieranie zaworu powietrza rozruchowego;

$u_2$  - blokada pomp paliwowych (zatrzymanie silnika);

$u_3$  - siłownika przesterowującego wał rozrzadu do pracy silnika naprzód;

$u_4$  - siłownika przesterowującego wał rozrzadu do pracy silnika wstecz;

$u_5$  - solenoidu regulatora (siłownik regulatora ograniczający dawkę paliwa do wartości zerowej);

$u_6$  - zaworu końca rozruchu (odcinającego powietrze rozruchowe od silnika). Analogowy sygnał sterujący:  $u_1$  - zadana wartość prędkości katowej wału silnika.

Sygnałem wyjściowym silnika jest  $y_1 = \omega$  - prędkość katowa wału silnika, a jako zmienną stanu przyjęto  $x_1 = \omega_0$  - prędkość katowa wału silnika w

poprzednim kroku symulacji.

W celu wyrażenia stanów pracy silnika za pomocą funkcji boolowskich wprowadzono pomocnicze zmienne o charakterze logicznym, którym przypisano następujące wartości logiczne:

$w_1$  - zmienna opisująca pozycję ustawienia wału rozrządu silnika.

$$w_1 = \begin{cases} 1 & \text{dla ustawienia wału rozrządu do pracy naprzód,} \\ 0 & \text{dla ustawienia wału rozrządu do pracy wstecz.} \end{cases}$$

$w_2$  - zmienna opisująca kierunek obrotów wału napędowego silnika.

$$w_2 = \begin{cases} 1 & \text{dla obrotów wału napędowego silnika naprzód,} \\ 0 & \text{dla obrotów wału napędowego silnika wstecz.} \end{cases}$$

$w_3, w_4, w_5$  - zmienne opisujące przekroczenie zadanych wartości prędkości kątowych wału silnika.

$$w_3 = \begin{cases} 1 & \text{dla } \omega = 0 \\ 0 & \text{dla } \omega \neq 0 \end{cases}$$

$$w_4 = \begin{cases} 1 & \text{dla } |\omega| \geq \omega_z \\ 0 & \text{dla } |\omega| < \omega_z \end{cases}$$

$$w_5 = \begin{cases} 1 & \text{dla } |\omega| \geq \text{PMP} \\ 0 & \text{dla } |\omega| < \text{PMP} \end{cases}$$

gdzie:  $\omega_z$  - minimalna prędkość kątowa, przy której możliwy jest zapłon silnika, PMP - prędkość maksymalna silnika napędzanego powietrzem rozruchowym.

Nawrotny, wysokoprężny silnik spalinowy posiada dwa reżimy pracy:

1. Postój silnika - stan silnika, gdy prędkość kątowa jest równa zero.
2. Praca silnika 1 - stan silnika, w którym realizowane są funkcje regulacji prędkości kątowej i obciążania silnika, przy obrotach "naprzód".
3. Praca silnika 2 - stan silnika, w którym realizowane są funkcje regulacji prędkości kątowej i obciążania silnika, przy obrotach "wstecz".

Dla silnika wyróżniamy następujące procesy przejściowe:

1. Spadek swobodny prędkości kątowej silnika (wybieg silnika). Prędkość kątowa silnika zmniejsza się do zera na skutek działania jedynie momentów tarcia.
2. Rozruch silnika; prędkość kątowa rośnie do określonej wartości na skutek działania momentu napędzającego silnik, pochodzącego od działania powietrza rozruchowego.
3. Przeszterowanie silnika. Obracający się wał silnika na skutek działania momentu pochodzącego od powietrza rozruchowego jest w pierwszej fazie hamowany, a w następnej uzyskuje obroty w przeciwnym kierunku i przechodzi w stan przejściowy - rozruch silnika.

W modelu matematycznym wysokoprężnego silnika spalinyowego dla każdego z wymienionych reżimów i stanów przejściowych określono funkcje opisujące zależności prędkości kątowej od czasu, które wynikają z przyjętego modelu i rozwiązania równania różniczkowego (6). Funkcje identyfikujące reżimy i stany przejściowe zestawiono w tabelach, a funkcję opisującą prędkość kątową silnika przedstawiono w postaci rekurencyjnej.

Tabela 1

## Praca silnika

$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$
0	0	X	0	0	X	1	1	0	1	X
1	0	X	0	0	0	1	1	0	1	X
0	0	0	X	0	X	0	0	0	1	X
1	0	0	X	0	0	0	0	0	1	X

Opis matematyczny uwzględniający własności silnika i układu regulacji przyjęto z [3].

W tabeli przyjęto następujące oznaczenia wartości logicznych:

- 1 - wysoki stan sygnału logicznego,
- 0 - niski stan sygnału logicznego,
- X - dowolny stan sygnału logicznego.

Tabela 2

## Postój silnika

$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$
0	X	X	X	X	X	X	X	1	0	0

Funkcja rekurencyjna:  $\omega = 0$ ,  $\omega_0 = 0$ .

Tabela 3

## Wybieg silnika

$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$
0	1	X	X	X	X	X	X	0	1	X
0	X	X	X	1	X	X	X	0	1	X
1	1	X	X	X	1	X	X	0	1	X
1	X	X	X	1	1	X	X	0	1	X
0	X	X	X	X	X	X	X	0	1	X
1	X	X	X	X	1	X	X	0	0	X

Funkcja rekurencyjna:  $\omega = \omega_0 e^{-\frac{\Delta t}{T}}$

gdzie:  $\Delta t$  - przyrost czasu.

Tabela 4

Silnik napędzany powietrzem rozruchowym

$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$
1	1	X	0	X	0	1	1	0	X	0
1	X	X	0	1	0	1	1	0	X	0
1	1	0	X	X	0	0	0	0	X	0
1	X	0	X	1	0	0	0	0	X	0

Funkcja rekurencyjna:  $\omega = \text{sign}(\omega_0) \text{PMP} \left(1 - e^{-\frac{(\tau + \Delta t)}{T}}\right)$

gdzie:  $\tau = -T \ln \left(1 - \frac{|\omega_0|}{\text{PMP}}\right)$

Tabela 6

Przesterowanie silnika

$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$
1	X	0	X	X	0	0	1	0	0	0
1	X	X	0	X	0	1	0	0	0	0
1	1	0	X	X	0	0	1	0	1	X
1	X	0	X	1	0	0	1	0	1	X
1	1	X	0	X	0	1	0	0	1	X
1	X	X	0	1	0	1	0	0	1	X

Funkcja rekurencyjna:  $\omega = \omega_0 - \text{sign}(\omega_0) \text{PMP} \left(1 - e^{-\frac{(\tau + \Delta t)}{T}}\right)$

## 5. Zakończenie

Przedstawiona w referacie metodyka tworzenia modeli symulacyjnych może być przydatna przy rozwiązywaniu zagadnień dotyczących oceny poprawności sterowania binarnego oraz projektowania układów sterowania binarnego.

W zaprezentowanym modelu silnika jako obiektu sterowania binarnego przedstawiono opis matematyczny reżimów pracy, jakie występują przy poprawnym sterowaniu. W trakcie badań symulacyjnych mogą wystąpić kombinacje sygnałów logicznych na wejściach obiektu, które nie zostały uwzględnione w tabelach - niepoprawne sterowanie obiektu, prowadzące w wielu przypadkach do awarii. Pełny opis obiektu sterowania wymaga powiązania wszystkich możliwych kombinacji dyskretnych sygnałów sterujących z normalnymi reżimami pracy, normalnymi procesami przejściowymi oraz z awaryjnymi reżimami pracy i awaryjnymi procesami przejściowymi. Metodyka tworzenia opisu matematycznego awaryjnych reżimów pracy i awaryjnych procesów przejściowych jest analogiczna do przedstawionej w p. 2, jednakże może wystąpić trudność ich opisu klasa liniowych, stacjonarnych modeli.

Przedstawiony model wysokoprężnego silnika spalinowego został wykorzystany do symulacji układu automatycznego sterowania okrętowego zespołu napędowego [1,2]. Na podstawie algorytmów heurystycznych badań symulacyjnych wyszukano testy diagnostyczne dyskretniej części układu automaty-



cznego sterowania wysokoprężnych silników spalinowych typu PC, pracujących równolegle w zespole napędu głównego statku.

#### Literatura

- [1] Arendt R.: Symulacja sieci logicznych złożonych z elementów wykorzystujących różne typy nośników sygnałów. III Krajowa Konferencja Pneumatycznych i hydraulicznych elementów automatyki przemysłowej. Warszawa 1984.
- [2] Arendt R. Metodyka generacji testów diagnostycznych wybranej klasy binarnych układów sterowania z zastosowaniem metod symulacyjnych. Praca doktorska, Masz. powiel. 1991.
- [3] Kowalski Z.: Badania symulacyjne podsystemów napędowych statków. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Elektryka, 1980, Nr 46.
- [4] M. A. N. - Funktionsbeschreibung. Pneumatische Fernbedienungsautomatik für umsteuerbaren Motor mit Hebel Handbedienung. Typ RV/VV 40/54.
- [5] Rączkowski J., Niewczas W.: Nieliniowe progresywne algorytmy uniwersalnych regulatorów procesów ciągłych. XI KKA Białystok 1991.
- [6] Shanon E. P.: System simulations the art and science. Prentice - Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey 1975.

Recenzent: Prof.dr h.inż. Jerzy Klamka

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1992 r.

#### Abstract:

Applying simulation methods the problem of models for continuous objects (which are controlled with discrete signals i.e. binary control) is often encountered. The binary control is used to change the constant state of object operation (further called regime). In the production system the realised technological process defines a regime. For instance considering a Diesel engine, the regimes are: work and stop state of engine. Usually we can meet descriptions of the continuous control system with controllers as an example of regime. The regime and transient process of regime changes are described using the linear time invariant models. The Boolean functions depending on binary control signals and chosen object variables (transmitted through A/D converters) are created. The set of Boolean functions enables the recognizing of a regime and a transient process of the object. During the simulation different models depending on binary control signal values and chosen object parameters are used. The chosen state variables of object are memorized while "switching" the models. Due to some fault control signals an emergency regime and emergency transient process of an object can occur. An example of the marine Diesel engine model as a binary control object is presented. The marine engine control system simulation researches are carried on in order to obtain the diagnostic tests of a discrete part of the control system.