ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989
Seria: TRANSPORT z. 13 Nr kol. 1034

Roman KONIECZNY, Stanisław KRAWIEC

WYBRANE ZAGADNIENIA OPISU FORMALNEGO MODELU SYSTEMU ZŁOŻONEGO

Streszczenie. Artykuł stanowi próbę uporządkowania najważniejszych pojęć i definicji związanych z opisem modelu systemu złożonego, w aspekcie ich użyteczności do projektowania oprogramowania symulacyjnego. Rozważono aspekty opisu nieformalnego oraz opisu formalnego modelu systemu, zwracając szczególną uwagę na następujące zagadnienia: specyfikację zmiennych opisowych, hierarchię opisu oraz pojęcie stanu. Omówiono aspekty opisu systemów wejścia-wyjścia, systemów dyskretnych w czasie, systemów równań różniczkowych oraz systemów dyskretnych zdarzeń.

Przedstawiona w artykule problematyka stanowi jedynie pewien wycinek szerokiej klasy zagadnień związanych z kreowaniem i interpretacją opisów formalnych systemów złożonych. Niemniej, zaprezentowane sposoby opisu dają już pewne podstawy do tworzenia "bardziej formalnych" projektów oprogramowania symulacyjnego modeli systemów transportowych.

1. Uwagi wstępne

Rozwiązanie problemów powstających przy projektowaniu, budowie i eksploatacji systemów złożonych wymaga przeprowadzenia licznych badań związanych z oceną wskaźników charakteryzujących różnorodne właściwości systemu oraz wyborem optymalnej struktury systemu i optymalnych wartości jego parametrów. Przeprowadzenie takiego rodzaju badań jest możliwe tylko w wypadku dysponowania opisem matematycznym (modelem matematycznym) procesu funkcjonowania systemu.

Złożoność rzeczywistych systemów nie pozwala na opracowanie dla nich całkowicie adekwatnych modeli matematycznych. Model matematyczny opisuje więc pewien uproszczony proces, w którym występują tylko podstawowe zjawiska zachodzące w rzeczywistym procesie oraz tylko najważniejsze czynniki oddziaływujące na system rzeczywisty, przy czym są one zastąpione odpowiednimi układami formalnymi z punktu widzenia analitycznego lub procesu obliczeniowego [2].

W literaturze reprezentowane są różnorodne konwencje formalne opisu systemu. Przykłady ich podane są m.in. w pracach [1]...[18]. Artykuł niniejszy stanowi próbę uporządkowania najważniejszych pojęć i definicji związanych z opisem modelu systemu złożonego, w aspekcie ich użyteczności do projektowania oprogramowania symulacyjnego.

2. Nieformalny opis modelu

Opis formalny modelu systemu poprzedzony jest zazwyczaj opisem nieformalnym, który może być sporządzony w konwencji werbalistycznej [10]. W monografii [15] zaproponowano schemat opisu nieformalnego modelu systemu, składający się ze specyfikacji elementów systemu, zmiennych opisowych i parametrów, interakcji elementów oraz schematu oddziaływań międzyelementowych. Wzorzec takiego opisu może być następujący:

Elementy

ELEMENT_A
ELEMENT_B
...
ELEMENT_Z

Pewien ogólny opis łączący elementy
z pojęciowymi częściami systemu rzeczywistego.

Zmienne opisowe i parametry

ELEMENT_A
zmienna_A1
zmienna_A2
...
zmienna_An
parametr_1
parametr_2
...
parametr_k
ELEMENT_B
zmienna_B1
zmienna_B2
...
zmienna_Bm
parametr_1
parametr_2
...
parametr_h
. . . .
ELEMENT_Z
zmienna_Z1
zmienna_Z2
...
zmienna_Zq
parametr_1
parametr_2
...
parametr_w

Zakres każdej zmiennej (wartości jakie ona przyjmuje);
symbol oznaczający dowolny element tego zbioru (jeżeli jest wykorzystywany później w opisie formalnym);
zwięźle pokazana rola zmiennej w opisie elementów z nią związanych.

Zakres każdego parametru;
symbol oznaczający dowolny element tego zakresu (jeżeli jest później wykorzystywany);
rola parametru w opisie struktury modelu.

Interakcja elementów

(Wzajemny wpływ, oddziaływanie lub działanie elementów modelu, ich wzajemna komunikacja, opisane nieformalnie za pomocą założeń, reguł, praw itd.)

Schemat oddziaływań

(Elementy pokazane jako skrzynki zaetykietowane poprzez swoje nazwy, oddziaływania elementów oznaczone strzałkami skierowanymi. Schemat ten pokazuje zbiór przyczynowych ścieżek modelu.)

3. Pojęcie stanu

W wielu modelach możliwe jest określenie podzbioru wszystkich zmiennych opisowych takiego, że tylko bieżące wartości tych zmiennych muszą być dostępne dla komputera, w celu obliczenia przyszłych wartości wszystkich zmiennych opisowych. Zbiór taki nazywany jest *zbiorem zmiennych stanu* [15].

Rozważając model ze zmiennymi opisowymi a_1, a_2, ..., a_n, można powiedzieć, że wartości tych zmiennych w pewnym czasie t są z_1, z_2, ..., z_n, jeżeli w czasie tym zmienna a_1 posiada wartość z_1, zmienna a_2 wartość z_2, itd.

Model nazywany jest *dobrze opisanym*, jeżeli reguły interakcji elementów określają, dla każdego przyszłego czasu t' (większego od t), jednoznaczny zbiór wartości z'_1, z'_2, ..., z'_n, gdy w czasie t dane są wartości z_1, z_2, ..., z_n. Podzbiór zbioru zmiennych opisowych jest zbiorem zmiennych stanu, jeżeli wartości tych zmiennych w czasie t same jednoznacznie determinują wartości wszystkich zmiennych opisowych w pewnym przyszłym czasie t'.

Dla danego zbioru wartości stanu $z^i_1,\ldots,z^i_m$ w czasie t_i program symulacyjny oblicza jednoznaczne wartości opisowe z^{i+1}_1, ..., z^{i+1}_{m+1}, ...,z^{i+1}_n w czasie t_{i+1}, które są opisane za pomocą reguł interakcji. Jeżeli to jest prawdą, to mówi się, że program może obliczać przejście modelu od t_i do t_{i+1}. Ma to zastosowanie dla każdej z par czasu (t_i, t_{i+1}).

Elementy zbioru $\{t_1, t_2, \ldots\}$ nazywane są *momentami obliczeniowymi*. Są to czasy modelowe, dla których program może wytworzyć zbiór wartości opisowych modelu. Często czasy te są wielokrotnością pewnego kroku h tak, że $t_{i+1} - t_i = h$. Proces taki nazywany jest *symulacją dyskretną* w czasie. Model jest niezmienny w czasie, jeżeli reguły interakcji są niezależne od czasu, a zależą tylko od wartości stanu.

4. Formalny opis modelu

Na model popatrzeć można jako na moduł programowy (procedura, współprogram, proces), który przekształca ciąg wartości stanu w ciąg wartości opisowych. Zatem moduł taki może być przedstawiony jako wykonujący odwzorowanie f, którego dziedziną jest zbiór możliwych ciągów wartości stanu, a przeciwdziedziną zbiór możliwych ciągów wartości opisowych [15].

$$f(z_1,\ldots,z_m) = (z'_1,\ldots,z'_m, z'_{m+1},\ldots,z'_n) \qquad (1)$$

Równanie (1) opisuje sytuację, w której moduł przekształca ciąg $z_1,\ldots,z_m$ w ciąg $z'_1,\ldots,z'_n$. Odwzorowanie f może być przedstawione jako składające się z dwóch funkcji: jedna dla danego ciągu $z_1,\ldots,z_m$ wytwarza ciąg $z'_1,\ldots,z'_m$, a druga przekształca oba ciągi $z_1,\ldots,z_m$ oraz $z'_1,\ldots,z'_m$ w ciąg $z'_1,\ldots,z'_m, z'_{m+1},\ldots,z'_n$ (wartości $z'_1,\ldots,z'_m$ są jedynie kopiowane).

Oznaczając te funkcje symbolami ϕ i ψ, można napisać:

$$\phi(z_1,\dots,z_m) = (z'_1,\dots,z'_m) \qquad (2)$$

$$\psi((z_1,\dots,z_m),(z'_1,\dots,z'_m)) = (z'_1,\dots,z'_m,\ z'_{m+1},\dots,z'_n) \qquad (3)$$

$$f(z_1,\dots,z_m) = \psi((z_1,\dots,z_m),\ \phi(z_1,\dots,z_m)) \qquad (4)$$

Powyższe zapisy można zilustrować następująco:

$$z_1,\dots,z_m \longrightarrow f \longrightarrow z'_1,\dots,z'_m,\ z'_{m+1},\dots,z'_n \qquad \text{lub}$$

$$z_1,\dots,z_m \longrightarrow \phi \longrightarrow z'_1 \ \dots,z'_m \longrightarrow \psi \longrightarrow z'_1,\dots,z'_n$$

Często funkcja ψ jest niezależna od wartości $z_1,\dots,z_m$ i wtedy jest możliwa prostsza postać zapisu równań (2), (3) i (4):

$$\phi(z_1,\dots,z_m) = (z'_1,\dots,z'_m) \qquad (5)$$

$$\psi(z'_1,\dots,z'_m) = (z'_1,\dots,z'_n) \qquad (6)$$

$$f(z_1,\dots,z_m) = \psi(\phi(z_1,\dots,z_m)) \qquad (7)$$

Zapisy (5)-(7) można zilustrować następująco:

$$z_1,\dots,z_m \longrightarrow \phi \longrightarrow z'_1,\dots,z'_m \longrightarrow \psi \longrightarrow z'_1,\dots,z'_n$$

Zapis (7) nazywany jest *postacią normalną* funkcji f. Dla wielu modeli zbiór zmiennych stanu może być tak dobrany, że prowadzi to do postaci normalnej funkcji f.

Przekształcenie ϕ nazywane jest funkcja przejścia stanu . Na podstawie ciągu wartości zmiennych stanu modelu w czasie t_i wytwarza ono ciąg wartości zmiennych stanu modelu w czasie t_{i+1}. (Innymi słowy, funkcja ϕ przekształca stan, w którym się znajduje model w bieżącej chwili obliczeniowej, w stan w którym będzie się on znajdował w następnej chwili obliczeniowej).

Przekształcenie ψ nazywane jest funkcja wyjścia . Przekształca ono ciąg wartości zmiennych stanu w pewnej chwili obliczeniowej, w ciąg wartości opisowych w tej samej chwili. (Innymi słowy, funkcja ψ przekształca bieżący stan modelu - w całkowity opis modelu w tym stanie).

Zbiór wszystkich możliwych dopuszczalnych przydziałów wartości dla zmiennych stanu (nazywany produktem kartezjańskim zakresów zmiennych stanu) może być oznaczony przez:

$$\mathbf{ZS} = \bigtimes_{zs\ \in\ \mathrm{ZMIENNE\_STANU}} \mathrm{ZAKRES\_}zs \qquad (8)$$

lub przez: $\mathbf{ZS} = \mathrm{ZAKRES\_}zs_1 \times \mathrm{ZAKRES\_}zs_2 \times \dots \times \mathrm{ZAKRES\_}zs_i \times \dots$

gdzie: ZMIENNE_STANU są podzbiorem zmiennych opisowych, reprezentującym wybrane zmienne stanu modelu;
(ZMIENNE_OPISOWE = { ZMIENNE_STANU, ZMIENNE_WYJŚCIOWE });
zs_i jest i-tą zmienną stanu, a ZAKRES_zs_i jest jej zakresem
(tj. zbiorem wartości jakie może przyjmować zs_i) .

Model często nie musi dotyczyć wszystkich możliwych przydziałów zmiennych stanu (które w sensie rozpatrywanego zadania nie są stanami modelowanego systemu). Natomiast często określa się podzbiór, zwany *zbiorem stanów modelu*, który należy do zbioru wartości stanu. Podzbiór ten można oznaczyć jako **STANY**.

Powyższa uwaga może być zapisana w prostszej formie:

$$\mathbf{STANY} \subseteq \mathbf{ZS} \tag{9}$$

Zbiór **ZS** nazywany jest również *przestrzenią stanów* [2].

Analogicznie dla zmiennych wyjściowych można napisać:

$$\mathbf{ZWY} = \underset{zwy \in \mathrm{ZMIENNE\_WYJSCIOWE}}{\times} \mathrm{ZAKRES\_}zwy \tag{10}$$

gdzie *zwy* oznacza zmienną wyjściową.

Zbiór **ZWY** nazywany jest *przestrzenią zmiennych wyjściowych* [2]. Dla wyjścia modelu można określić zbiór **WYJSCIA**, który jest podzbiorem **ZWY**.

Funkcje przejścia i wyjścia określają jak zmienia się opis modelu w czasie (modelowym) [15]. W przypadku modelu niezmiennego w czasie i dyskretnego kroku h, normalna postać tych funkcji może być prosto wyrażona jako:

$$\phi_h : \mathbf{STANY} \longrightarrow \mathbf{STANY} \quad \text{i} \quad \psi : \mathbf{STANY} \longrightarrow \mathbf{WYJSCIA} \tag{11}$$

Jeżeli ϕ_h i ψ poprawnie opisują reguły interakcji modelu to interpretacja zapisu (11) jest następująca: jeżeli STAN jest stanem modelu w chwili obliczeniowej t_i, to ϕ_h(STAN) jest stanem modelu w czasie $t_i + h$, a ψ(STAN) jest wyjściem modelu w czasie t_i.

Czwórka < **STANY** , **WYJSCIA** , ϕ , ψ > tworzy opis systemu *dyskretnego w czasie* (często przytaczanego jako automat lub maszyna sekwencyjna) [15]. System ten jest autonomiczny, ponieważ nie ma zbioru wejść.

W przypadku szczegółowego opisu systemu dyskretnego w czasie *reakcję systemu* można zdefiniować formalnie. Niech $[t,t']$ będzie *przedziałem obserwacyjnym*, w którym wykonywana jest symulacja, i niech $t_M,\dots,t_M+Nh$ będą sekwencją chwil obliczeniowych zawartą w przedziale obserwacyjnym, tak że $t=t_M$ i $t'=t_M+Nh$. Do każdego STANU q i przedziału obserwacyjnego $[t,t']$ można przywiązać sekwencję stanów $q_M, q_{M+1},\dots,q_{M+N}$. Sekwencja ta reprezentuje kolejne STANY, przez które przechodzi model, gdy przebieg rozpoczęty został w stanie q i czasie t i trwa aż do momentu t'. Na podstawie funkcji przejścia model wygenerowywuje sekwencję stanów, gdyż $q_{M+i} = \phi_h(q_{M+i-1})$ dla każdego i od 1 do N. Formuła ta, nazywana *rekursywną* lub *iteracyjną* [15], wskazuje jak obliczyć kolejne stany, mając dany pierwszy. Sekwencja $q_M, q_{M+1},\dots,q_{M+N}$ wskazuje, które stany są generowane i w jakim porządku, lecz nie zawiera żadnych informacji o czasach, w których model przechodzi przez te stany. W celu ich uzyskania wprowadza się funkcję zwaną *trajektorią stanów* [15] związaną ze STANEM q i przedziałem obserwacyjnym $[t,t']$, którą można oznaczyć jako $\mathrm{TR\_S}_{q,[t,t']}$. Funkcja $\mathrm{TR\_S}_{q,[t,t']}$ z definicji przekształca $\{ t_M, t_M+h,\dots, t_M+Nh \}$ w STANY w taki sposób, że:

$$TR\_S_{q,[t,t']}(t_M+ih) = q_{M+i} \quad \text{dla} \quad 0 \le i \le N \qquad (12)$$

Oznacza to, że w i-tej chwili obliczeniowej t_M+ih stan modelu jest q_{M+i} (i-ty element sekwencji stanów).

Odpowiednio do sekwencji STANÓW $q_M, q_{M+1}, \ldots, q_{M+N}$ generowana jest przez model sekwencja WYJŚĆ $\psi(q_M)$, $\psi(q_{M+1}), \ldots, \psi(q_{M+N})$. W celu powiązania WYJŚĆ z czasami, w których one występują, wprowadza się funkcję

$$TR\_WY_{q,[t,t']} : \{ t_M, t_M + h, \ldots, t_M + Nh \} \longrightarrow \text{WYJŚCIA}, \qquad (13)$$

zwaną *trajektorią wyjściową* [15] związaną ze STANEM q i przedziałem $[t,t']$.

Podobnie, jak w (12):

$$TR\_WY_{q,[t,t']}(t_M+ih) = \psi(q_{M+i}) \quad \text{dla} \quad 0 \le i \le N \qquad (14)$$

Trajektorie $TR\_S_{q,[t,t']}$ i $TR\_WY_{q,[t,t']}$ mogą być przedstawione za pomocą poniższej tablicy:

czas	STAN	WYJŚCIE
t_M	q_M	$\psi(q_M)$
$t_M + h$	q_{M+1}	$\psi(q_{M+1})$
$t_M + 2h$	q_{M+2}	$\psi(q_{M+2})$
... ...	... ...	... ...
$t_M + Nh$	q_{M+N}	$\psi(q_{M+N})$

Zbiór wszystkich trajektorii stanów nazywa się *reakcją stanów* modelu, a zbiór wszystkich trajektorii wyjściowych *reakcją wyjściową* [15].

W przypadku systemu nieautonomicznego zbiór zmiennych opisowych modelu rozszerzony zostaje o ZMIENNE_WEJŚCIOWE, których wartości determinowane są poza modelem. Pozostałe zmienne ZMIENNE_NIE_WEJŚCIOWE pozostają (przynajmniej częściowo) pod kontrolą modelu.

W pracy [15] zmienne opisowe modelu systemu nieautonomicznego sklasyfikowano następująco:

ZMIENNE_OPISOWE = { ZMIENNE_WEJŚCIOWE, ZMIENNE_NIE_WEJŚCIOWE }

ZMIENNE_NIE_WEJŚCIOWE = { ZMIENNE_STANU, ZMIENNE_NIE_STANU } .

Można powiedzieć, że model jest *dobrze opisany*, jeżeli wartości ZMIENNYCH_NIE_WEJŚCIOWYCH w dowolnym czasie t oraz trajektoria wartości ZMIENNYCH_WEJŚCIOWYCH w przedziale $[t,t']$ (gdzie $t'>t$) jednoznacznie determinują wartości ZMIENNYCH_NIE_WEJŚCIOWYCH w czasie t'. (Zatem w przypadku modelu autonomicznego jest on dobrze opisany wtedy i tylko wtedy, jeżeli posiada zbiór zmiennych stanu [15]).

Zawężając rozważania do modeli dyskretnych, niezmiennych w czasie, można za [15] przytoczyć następujące twierdzenie:

Podzbiór ZMIENNYCH_NIE_WEJŚCIOWYCH *jest zbiorem zmiennych stanu wtedy i tylko wtedy, jeżeli wartości tych zmiennych w dowolnym czasie* t *oraz wartości* ZMIENNYCH_WEJŚCIOWYCH *w czasie* t *i* $t+h$ *jednoznacznie determinują wartości* ZMIENNYCH_NIE_WEJŚCIOWYCH *w czasie* $t+h$.

W efekcie prowadzi to do definicji *maszyny sekwencyjnej*, która jest piątką: $<$ WEJŚCIA, STANY, WYJŚCIA, ϕ_h, ψ $>$, gdzie WEJŚCIA, STANY i WYJŚCIA są odpowiednio podzbiorami produktu kartezjańskiego zakresów ZMIENNYCH_WEJŚCIOWYCH, ZMIENNYCH_STANU i ZMIENNYCH_ WYJŚCIOWYCH; ϕ_h jest funkcją przejścia stanu a ψ funkcją wyjściową

$$\left.\begin{array}{l} \phi_h : \text{STANY} \times \text{WEJŚCIA} \longrightarrow \text{STANY} \\ \psi : \text{STANY} \times \text{WEJŚCIA} \longrightarrow \text{WYJŚCIA} \end{array}\right\} \qquad (15)$$

Sekwencją stanów związaną ze stanem q i sekwencją WEJŚCIOWĄ $x_M, x_{M+1}, \ldots, x_{M+N}$ jest sekwencja $q_M, q_{M+1}, \ldots, q_{M+N}$, gdzie $q_M = q$ i $q_{M+i+1} = \phi_h(q_{M+i}, x_i)$ dla $i = 0, 1, \ldots, N-1$.

Sekwencją wyjściową związaną ze stanem q i sekwencją wejściową $x_M, x_{M+1}, \ldots, x_{M+N}$ jest $y_M, y_{M+1}, \ldots, y_{M+N}$, gdzie $y_{M+i} = \psi(q_{M+i}, x_{M+i})$ dla $i = 0, 1, \ldots, N$.

Analogicznie do modelu autonomicznego można także zdefiniować trajektorie: wejściową, stanów i wyjściową, które dokładnie umiejscowią elementy powyższych sekwencji w ich odpowiednich położeniach w czasie. *Reakcją stanów modelu* nazywany jest zbiór wszystkich par trajektorii wejścia-stanów. *Reakcją wejścia-wyjścia modelu* nazywany jest zbiór wszystkich par trajektorii wejścia-wyjścia [15].

5. Składniki opisu systemu

Każdy poziom w hierarchii opisów systemów może być rozpatrywany dwojako: jako poziom opisu lub jako poziom wiedzy [15]. Poziomy te można umownie ponumerować od 0 do 5.

Na *poziomie* 0 rozpatrywana jest pierwotna informacja dotycząca reakcji systemu, nazywana relacją WE/WY systemu.

Na *poziomie* 1 rozpatrywany jest zbiór funkcji WE/WY, który dokonuje podziału relacji WE/WY systemu. Na *poziomie* 2 system jest opisywany za pomocą abstrakcyjnych zbiorów i funkcji. Zostają tu wprowadzone pojęcia przestrzeni stanów, funkcji przejścia i wyjściowej. Na *poziomie* 3 rozważane są postacie opisu systemu z poziomu 2, skrócone przez przedstawienie tylko jego generatorowych segmentów wejściowych i przejść ze stanu do stanu, spowodowanych przez te segmenty. Poziom 3 zastąpiony jest przez poziom 2, na którym rozmaite klasy systemów opisane są przez dostarczenie tylko tych informacji, które wymagane są do rozróżnienia jednego elementu klasy od drugiego. Rozważanymi klasami są: maszyny sekwencyjne, systemy dyskretnych zdarzeń i równań różniczkowych.

Na *poziomie* 4 abstrakcyjne zbiory i funkcje z niższych poziomów przedstawiane są w postaci produktów kartezjańskich bardziej podstawowych zbiorów i funkcji. Odpowiada to poziomowi, na którym modele są często opisywane w sposób nieformalny.

Na *poziomie* 5 system jest opisany jako połączenie systemów składowych opisanych na poziomie 3. Poziom ten jest często stosowany dla dogodnego opisu modelu dla potrzeb projektu programu symulacyjnego.

5.1. Podstawa czasu

Formalnie podstawa czasu jest zbiorem T. Zbiór T może być izomorficzny w odniesieniu do zbioru liczb rzeczywistych $\mathcal{R}$ (*ciągła* podstawa czasu) lub w odniesieniu do zbioru liczb całkowitych (*dyskretna* podstawa czasu). W obu przypadkach wykorzystywane są następujące własności liczb rzeczywistych i całkowitych: *porządkowanie liniowe, grupa abelowa, nieograniczony zakres i uporządkowanie przez dodawanie* [15].

Własność liniowego uporządkowania umożliwia kodowanie pojęć z przeszłości i przyszłości w odniesieniu do teraźniejszości. Jeżeli $t \in T$ jest interpretowane jako teraźniejszość, to $\{ t' : t'<t \}$ jest przeszłością, a $\{ t' : t'>t \}$ jest przyszłością. Własność grup pozwala rozważać przekształcanie trajektorii. Własność nieograniczonego zakresu umożliwia zajmowanie się trajektoriami o ograniczonej, lecz dowolnie dużej długości. Zachowanie uporządkowania przez dodawanie zapewnia, że w trakcie przekształcania trajektorii zachowana zostaje chronologia rejestrowanych przez nią zdarzeń.

Mając podstawę czasu T, można opisać występowanie zdarzeń w czasie. Dla każdej pary $t_0, t_1 \in T$ takiej, że $t_0 \le t_1$, istnieją związane z nią *przedziały obserwacyjne* oznaczone (niejednoznacznie) przez $\langle t_0, t_1 \rangle$, gdzie: $\langle t_0, t_1 \rangle \in \{ (t_0, t_1), [t_0, t_1), (t_0, t_1], [t_0, t_1] \}$. Dla przedziału $\langle t_0, t_1 \rangle$, t_0 nazywa się *czasem początkowym* lub *rozpoczęcia*, a t_1 - *czasem końcowym* lub *zakończenia*.

Segmentem (lub *trajektorią*) określonym na Z i T nazywane jest przekształcenie ω przedziału T w Z, dla jakiejś pary $\langle t_0, t_1 \rangle$:

$$\omega : \langle t_0, t_1 \rangle \longrightarrow Z \tag{16}$$

gdzie Z może oznaczać np. zbiór wejściowy, stanów lub wyjściowy modelu.

Ponieważ Z może być zbiorem skończonym, przeliczalnym (dyskretnym) lub nieprzeliczalnym (ciągłym), a T może być zbiorem przeliczalnym lub nieprzeliczalnym, więc istnieje sześć rodzajów segmentów, każdy przeznaczony dla pewnych klas systemów [15].

Trajektoria ω: $\langle t_0, t_1 \rangle \longrightarrow Z$ opisuje ruch w zbiorze Z, który rozpoczyna się czasie t_0, a kończy w t_1. Dla każdego $t \in \langle t_0, t_1\rangle$ wielkość $\omega(t)$ określa gdzie "znajduje się" ten ruch w czasie t.

5.2. Obserwacja relacji wejścia-wyjścia

W celu opisu systemu na podstawowym poziomie eksperymentu, można przyjąć, że rozpatrywany system rzeczywisty jest w pewnym sensie izolowany, i że należy określić jego zbiór zmiennych wejściowych i wyjściowych. Poprzez *zmienną wejściową* rozumie się taką zmienną, która oddziaływuje na system, lecz nie podlega jego bezpośredniemu wpływowi; *zmienną wyjściową* natomiast można bezpośrednio obserwować za pomocą pewnego rodzaju metody pomiarowej. Jeżeli $x_1,\dots,x_n$ oznaczają zmienne wejściowe, a $X_1,\dots,X_n$ zbiory określające ich zakresy, to produkt kartezjański $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ przedstawia zbiór wszystkich możliwych oznaczeń wartości tych zmiennych wejściowych [15] (przestrzeń zmiennych wejściowych [2]). Zbiór X nazywany jest *zbiorem wejściowym* - i na podstawowym poziomie wiedzy rozpatrywany jest jako zbiór abstrakcyjny, niezależny od jakiejkolwiek reprezentacji. Podobnie rozpatrywany jest abstrakcyjny zbiór Y jako *zbiór wyjściowy*.

"Podając" na wejście systemu segment ze zbioru (X,T), można obserwować na wyjściu segment ze zbioru (Y,T). Segment $\omega \in (X,T)$ nazywany jest *wejściowym*, a segment $\rho \in (Y,T)$ - *wyjściowym* (lub *trajektorią*). Generalnie przyjmowana jest konwencja, że segment wyjściowy zaobserwowany w odpowiedzi na segment wejściowy jest rejestrowany w tym samym przedziale obserwacyjnym. Zatem jeżeli ω i ρ są powiązane to dziedzina segmentu ω równa jest dziedzinie segmentu ρ. Para (ω,ρ) nazywana jest *parą wejścia-wyjścia* (lub WE/WY). Zbiór takich par nazywany jest *relacją WY/WY*. Ponieważ czas eksperymentu zwykle jest ograniczony, więc można zgromadzić tylko skończoną liczbę par WE/WY. Ponadto w eksperymentowaniu rozważany jest tylko pewien podzbiór Ω wszystkich możliwych segmentów wejściowych.

W pracy [15] sformułowano następującą definicję:

Obserwacją relacji WE/WY nazywamy strukturę (T,X,Ω,Y,R) ***, gdzie:*** T ***- podstawa czasu,*** X ***- zbiór wartości wejściowych,*** Y ***- zbiór wartości wyjściowych,*** Ω ***- zbiór segmentów wejściowych,*** R ***- relacja WE/WY. W strukturze tej zachodzą związki: a)*** $\Omega \subseteq (X,T)$ ***i b)*** $R \subseteq \Omega \times (Y,T)$***, gdzie*** $(\omega,\rho) \in R \Rightarrow D(\omega) = D(\rho)$ ***;*** $D(\omega)$ ***oznacza dziedzinę*** ω ***.***

5.3. Obserwacja funkcji wejścia-wyjścia

Pojęcie stanu można rozważyć w bardziej abstrakcyjnej postaci, koncentrując się na roli stanów w jednoznacznym determinowaniu transformacji segmentów wejściowych na segmenty wyjściowe. Zakładając, że realizowane jest kilka eksperymentów symulacyjnych na modelu w taki sposób, że po każdorazowym zastosowaniu segmentu wejściowego przywracany jest ten sam *stan początkowy* modelu. Poprzez taką inicjację i powtarzanie w przebiegach własności zmiennych stanu, otrzymany będzie jeden i tylko jeden segment wyjściowy związany z poszczególnym segmentem wejściowym. W ten sposób otrzymywany jest zbiór par WE/WY stanowiący funkcję WE/WY. Jeżeli eksperyment ten zrealizowany będzie dla pewnej liczby stanów modelu, to uzyskany zostanie zbiór funkcji WE/WY, w którym na każdy taki stan przypadnie jedna funkcja. Na bazie powyższego można sformułować następującą definicję [15]:

Obserwacją funkcji WE/WY nazywamy strukturę (T,X,Ω,Y,F) *, gdzie* T,X,Ω *i* Y *są określone jak w p.5.2., a* F *jest zbiorem funkcji WE/WY takim, że* $f \in F \Rightarrow f \subseteq \Omega \times (Y,T)$ *jest funkcją, i jeżeli* $\rho = f(\omega)$, *to* $D(\rho) = D(\omega)$.

Mając obserwację funkcji WE/WY (T,X,Ω,Y,F) , można połączyć ją z obserwacją relacji WE/WY (T,X,Ω,Y,R), gdzie $R = \bigcup f$ dla $f \in F$. Innymi słowy, gromadząc wszystkie pary segmentów WE/WY, które zostały wcześniej podzielone na grupy funkcjonalne, otrzymuje się relację WE/WY.

5.4. <u>System wejścia-wyjścia</u>

Systemem *wejścia-wyjścia (WE/WY)* nazywana jest struktura [15]:

$$S = \langle T,\ X,\ \Omega,\ Q,\ Y,\ \phi,\ \psi \rangle \qquad (17)$$

gdzie:

T - podstawa czasu,
X - zbiór wartości wejściowych,
Ω - podzbiór zbioru (X,T) - zbiór segmentów wejściowych,
Q - zbiór stanów,
Y - zbiór wartości wyjściowych,
ϕ - funkcja przejścia stanu,
ψ - funkcja wyjściowa.

Struktura (17) spełnia następujące aksjomaty [15]:

1. *Zbiór* Ω *jest domknięty ze względu na kompozycję.*
2. *Reakcja deterministyczna. Funkcja* ϕ *jest przekształceniem* $\phi : Q \times \Omega \longrightarrow Q$, *a funkcja* ψ *przekształceniem* $\psi : Q \longrightarrow Y$.
3. *Własność kompozycji. Dla każdej przyległej pary segmentów* $\omega,\omega' \in \Omega$ *jest spełnione:* $\phi(q,\ \omega * \omega') = \phi(\phi(q,\omega),\omega')$.

Para segmentów $\omega,\omega' \in (Z,T)$ jest *przyległa*, jeżeli ich dziedziny są przyległe, tj. $\omega : \langle t_0,t_1\rangle \longrightarrow Z$ i $\omega' : \langle t_1,t_2\rangle \longrightarrow Z$ dla pewnych $t_0,t_1,t_2 \in T$. Pary przyległych segmentów można "połączyć" w celu utworzenia nowego segmentu. *Kompozycją* danych segmentów $\omega : \langle t_0,t_1\rangle \longrightarrow Z$ i $\omega : \langle t_1,t_2\rangle \longrightarrow Z$ nazywany jest segment μ taki, że $\mu : \langle t_0,t_2\rangle \longrightarrow Z$. Pojęcie kompozycji pozwala sformułować realizację kolejnych eksperymentów WE/WY na systemie. Jeżeli na wejście systemu podany jest segment wejściowy ω i bezpośrednio za nim drugi segment ω', to $\omega * \omega'$ opisuje otrzymany w wyniku tego eksperyment złożony. Podzbiór Ω zbioru (Z,T) jest *domknięty ze względu na kompozycję*, jeżeli dla każdej przyległej pary $\omega,\omega' \in \Omega$ zachodzi $\omega * \omega' \in \Omega$.

Jeżeli segment $\omega : \langle t_0,t_1\rangle \longrightarrow X$ można zastosować w czasie t_0 to można go także zastosować w pewnym innym czasie, np. t_2. W celu formalnego ujęcia tej idei należy rozważyć klasę operatorów unarnych określonych na zbiorze (X,T) i zwanych operatorami *przeniesienia*. Dla każdego $\tau \in T$, można zdefiniować *operator unarny* [15] $PN_\tau : (Z,T) \longrightarrow (Z,T)$, gdzie jeżeli $\omega : \langle t_0,t_1\rangle \longrightarrow Z$ i $PN_\tau(\omega)=\omega'$, to $\omega' : \langle t_0+\tau,t_1+\tau\rangle \longrightarrow Z$ i $\omega'(t+\tau)=\omega(t)$ dla $t \in \langle t_0,t_1\rangle$. PN_τ jest *τ-przeniesieniem segmentu* ω i ma taką samą postać jak ω, z wyjątkiem tego, że zostało przeniesione o τ jednostek w czasie.

Można powiedzieć, że zbiór $\Omega \subseteq (Z,T)$ jest *domknięty ze względu na przeniesienie*, jeżeli $\omega \in \Omega \Rightarrow \bigwedge_{\tau \in T} (PN_\tau(\omega) \in \Omega)$.

System $S = \langle T, X, \Omega, Q, Y, \phi, \psi \rangle$ jest *niezmienny w czasie*, jeżeli:

a) zbiór Ω jest domknięty ze względu na przeniesienie;

b) funkcja ϕ jest niezależna od czasu dla każdego $\tau \in T$, $\omega \in \Omega$ i $q \in Q$, tj. $\phi(q,\omega) = \phi(q,PN_\tau(\omega))$.

Dla systemu niezmiennego w czasie, jeżeli dany segment można zastosować gdzieś w czasie, to można go zastosować w całym zakresie czasu; ponadto zastosowanie takiego samego segmentu względem takiego samego stanu początkowego, powinno dać taki sam rezultat w całym rozpatrywanym zakresie czasowym.

Opisem iteracyjnym systemu nazywa się strukturę [15]:

$$G = \langle T, X, \Omega_a, Q, Y, \phi_a, \psi \rangle \tag{18}$$

gdzie:

T - zbiór podstawy czasu,
X - zbiór wartości wejściowych,
Ω_a - zbiór generatorów segmentów wejściowych,
Q - zbiór stanów,
Y - zbiór wartości wyjściowych,
ϕ_a - funkcja przejścia pojedynczego segmentu,
ψ - funkcja wyjściowa.

Ograniczenia nałożone na strukturę (18) są następujące:

$\Omega_a \subseteq (X,T)$, $\phi_a : Q \times \Omega_a \longrightarrow Q$, $\psi : Q \longrightarrow Y$,

oraz Ω_a jest dopuszczalnym zbiorem generatorów i $\phi_a : Q \times \Omega_a^+ \longrightarrow Q$ posiada własność kompozycji.

6. Klasy opisów systemów

Podział opisów systemów dokonywany jest zazwyczaj w oparciu o interpretację podstawy czasu. W pracy [2] rozróżniane są systemy ciągłe w czasie, dyskretne i mieszane. W pracy [15] z kolei systemy rozróżnia się jako: systemy dyskretne w czasie, systemy równań różniczkowych i systemy dyskretne w czasie. Dla każdego z tych systemów istnieje osobna klasa opisu.

6.1. Opis systemu dyskretnego w czasie

Opisem *systemu dyskretnego w czasie*, zwanego również *maszyną sekwencyjną*, nazywana jest następująca struktura [15] :

$$M = \langle X_M, Q_M, Y_M, \phi_M, \psi_M \rangle \tag{19}$$

gdzie X_M, Q_M, Y_M są zbiorami, $\phi_M : Q_M \times X_M \longrightarrow Q_M$, a $\psi_M : Q_M \longrightarrow Y$.
Do struktury M można dołączyć strukturę:

$$G(M) = \langle T, X, \Omega_a, Q, Y, \phi_a, \psi \rangle \tag{20}$$

która jest przekształceniem M w opis iteracyjny, gdzie:
$T = \mathscr{E}$, $X = X_M$, $\Omega_a = \{ \omega : \langle 0,1\rangle \longrightarrow X \}$, $Q = Q_M$, $Y = Y_M$,
$\phi_a : Q \times \Omega_a \longrightarrow Q$ jest określona przez $\phi_a(q,\omega) = \phi_M(q,\omega(0))$,
$\psi = \psi_M$.

Przedział $\langle t_0,t_1\rangle$ jest interpretowany jako $[t_0,t_1)$. Generatory w zbiorze Ω_a jednoznacznie odpowiadają wartościom wejściowym X, ponieważ przekształcenie $\omega : \langle 0,1 \rangle \longrightarrow X$ (równoznacznie $\omega : [0] \longrightarrow X$) jest jednoznacznie zdeterminowane przez wartość $\omega(0) \in X$. Zbiór Ω_a można opisać w sposób bardziej dogodny jako:

$$\Omega_a = \{ \omega_x : x \in X ,\quad \omega_x : \langle 0,1\rangle \longrightarrow X ,\quad \omega_x(0) = x \}$$

Naturalna kompozycja jest określona jako [15]:

$$\Omega_a^+ = \{ \omega_{x_1}, \omega_{x_2}, \dots, \omega_{x_n} : \quad x_i \in X^+ ,\ i = 1,2,\dots,n;\quad n = 1,2,\dots \}$$

X^+ – zdefiniowane jest jako zbiór wszystkich skończonych sekwencji elementów zbioru X, tj.

$$X^+ = \{ x_1,x_2,\dots,x_n : x_i \in X ,\ i = 1,2,\dots,n;\quad n = 1,2,\dots \}$$

Rozszerzenie funkcji $\bar{\phi}_M$ do zbioru X^+ zdefiniowano jako [15]:

$$\bar{\phi}_M : Q \times X^+ \longrightarrow Q ,$$

gdzie
$$\bar{\phi}_M(q,x_i) = \phi_M(q,x_i) \qquad \text{dla } x_i \in X ,$$
$$\bar{\phi}_M(q,x_i x) = \bar{\phi}_M(\phi_M(q,x_i),x) \qquad \text{dla } x_i \in X ,\quad x \in X^+ .$$

Maszyna sekwencyjna $M = \langle X, Q, Y, \phi, \psi \rangle$ jest *liniowa*, jeżeli X, Q, Y są przestrzeniami wektorowymi określonymi na pewnym obszarze F i dla odpowiednich macierzy (A,B,C) jest spełnione:

$$\phi(q,x) = Aq + Bx ,\quad \psi(q) = Cq .$$

Strukturę $M = \langle X_M, Q_M, Y_M, \phi_M, \psi_M \rangle$ można także interpretować jako obowiązującą w miejscach skoków w ciągłej podstawie czasu.

6.2. Opis systemu równań różniczkowych

Bardzo powszechny typ opisu systemu wykorzystuje równania różniczkowe.

Równania różniczkowe opisują chwilowe szybkości zmian zmiennych stanu jako funkcje zmiennych stanu i zmiennych wejściowych. Zatem w przeciwieństwie do maszyn sekwencyjnych i opisów dyskretnych zdarzeń, następne stany nie są wyznaczone bezpośrednio, lecz muszą być obliczone na podstawie informacji dotyczących występowania zmian w stanach.

Opisem systemu równań różniczkowych nazywana jest struktura [15]:

$$D = \langle X, Q, Y, \nu, \psi \rangle \qquad (21)$$

gdzie:

X - zbiór wartości wejściowych,
Q - zbiór stanów,
Y - zbiór wartości wyjściowych,
ν - funkcja szybkości zmian,
ψ - funkcja wyjściowa.

Na strukturę (21) nałożone są następujące ograniczenia:

a) X, Q, Y są przestrzeniami wektorowymi określonymi na zbiorze liczb rzeczywistych $\mathcal{R}$;

b) reakcje deterministyczne: $\nu : Q \times X \longrightarrow Q$, $\psi : Q \longrightarrow Y$.

Z założenia podstawa czasu T jest zbiorem liczb rzeczywistych, a generatory segmentów wejściowych są funkcjami ciągłymi ograniczonymi, przekształcającymi ograniczone przedziały zbioru T w zbiór X. Funkcję ν można interpretować przez pokazanie, w jaki sposób opisuje ona jednosegmentową funkcję przejścia opisu iteracyjnego.

Segment $\beta : \langle 0,\tau\rangle \longrightarrow Q$ jest *rozwiązaniem związanym* z ω i q, jeżeli:

1. $\beta(0) = q$,

2. $\dfrac{d\beta(t)}{dt} = \nu(\beta(t),\omega(t))$ dla każdego $t \in \langle 0,\tau\rangle$;

gdzie: $\omega : \langle 0,\tau\rangle \longrightarrow X$ i $q \in Q$ są odpowiednio segmentem wejściowym (otrzymanym z powyższej funkcji ciągłej ograniczonej) i stanem.

Warunki 1 i 2 podają dokładną definicję pojęcia "rozwiązanie równania różniczkowego". Rozwiązanie to będzie zależało od danej wartości początkowej $\beta(0) = q$, i w każdym momencie czasu musi spełniać równanie podane w p.2. Funkcja ν nie opisuje bezpośrednio w jaki sposób występują przejścia stanu, lecz tylko dostarcza testu dla zbadania, czy ruchy w przestrzeni stanów są rozwiązaniami.

Jeżeli istnieje jednoznaczne rozwiązanie $\beta_{q,\omega}$ związane z każdym stanem $q \in Q$ i segmentem ciągłym ograniczonym w postaci $\omega : \langle 0,\tau\rangle \longrightarrow X$ to struktura (21) posiada formalnie jednoznaczne rozwiązanie. Funkcja przejścia dla opisu iteracyjnego jest otrzymywana jako przekształcenie wykonywane przez to rozwiązanie; jest to przekształcenie stanu początkowego (na początku przedziału obserwacyjnego) w odpowiedni stan końcowy (osiągnięty na końcu przedziału obserwacyjnego).

Przekształceniem w opis iteracyjny będzie połączenie jednoznacznego rozwiązania $D = \langle X_D, Q_D, Y_D, \nu_D, \psi_D \rangle$ ze strukturą $G(D) = \langle T, X, \Omega_G, Q, Y, \phi_G, \psi \rangle$, gdzie $T = \mathcal{R}$, $X = X_D$, $\Omega_G = \{ \omega : \langle 0,\tau\rangle \longrightarrow X$ jest funkcją ciągłą i ograniczoną i $\tau>0$), $Q = Q_D$, $Y = Y_D$, $\psi = \psi_D$ i ϕ_α : $Q \times \Omega_\alpha \longrightarrow Q$ dane jest przez $\phi_\alpha(q,\omega) = \beta_{q,\omega}(\tau)$, gdzie $\omega : \langle 0,\tau \rangle \longrightarrow X$.

Struktura $D = \langle X, Q, Y, \nu, \psi \rangle$ jest *liniowym systemem równań różniczkowych*, jeżeli X, Q, Y są przestrzeniami wektorowymi określonymi na zbiorze $\mathcal{R}$ i jednocześnie:

$\nu(q,x) = Aq + Bx$ oraz $\psi(q) = Cq$.

6.3. Opis systemu dyskretnych zdarzeń

Opisem systemu dyskretnych zdarzeń nazywana jest struktura [15]:

$$M = \langle X_M, Q_M^*, Y_M, \phi_M^*, \psi_M, t^* \rangle \qquad (22)$$

gdzie:

X_M - zbiór zdarzeń zewnętrznych, Q_M^* - zbiór kolejnych stanów,

Y_M - zbiór wartości wyjściowych, ϕ_M^* - funkcja quasi-przejścia,

ψ_M - funkcja wyjściowa, t^* - funkcja postępu czasu;

a) t^* jest przekształceniem Q^* w zbiór nieujemnych liczb rzeczywistych wraz z ∞ : $t^* : Q^* \longrightarrow \mathcal{R}^+_{0,\infty}$

($t^*(q')$ interpretowane jest jako czas pozostania systemu w stanie q') ;

b) funkcja ϕ_M^* przekształca $Q_M \times (X \cup \{\emptyset\})$ w Q_M^* :

$$\phi_M^* : Q_M \times (X \cup \{\emptyset\}) \longrightarrow Q_M^*$$

gdzie $Q_M = \{ (q',t_e) : q' \in Q_M^*,\ 0 \le t_e \le t^*(q') \}$,
a $\emptyset$ jest specjalnym symbolem nie należącym do X, w taki sposób, że $\phi_M^*(q',t_e,\emptyset) = \phi_\emptyset(q')$ dla wszystkich $(q',t_e) \in Q_M$ gdzie $\phi_\emptyset : Q^* \longrightarrow Q^*$, symbol $\emptyset$ oznacza również brak występowania zdarzeń zewnętrznych.

Jeżeli nie występuje żadne zdarzenie zewnętrzne, to system popozostaje w stanie q' przez czas $t^*(q')$, po czym w sposób natychmiastowy przechodzi do stanu $\phi_\emptyset(q')$. Zatem $\phi_\emptyset(q')$ jest autonomiczną funkcją przejścia. Jeżeli pojawia się zdarzenie $x \in X$, a system do tej chwili przez czas t_e pozostawał w stanie q' to przechodzi on bezpośrednio do następnego stanu $\phi_M^*(q',t_e,x)$. Tak więc ϕ_M^* określa następny sekwencyjny element stanowy całkowitego stanu (q',t_e). Reakcję elementu upływu czasu określa założenie - interpretowane w ten sposób, że stan systemu pomiędzy zdarzeniami pozostaje stały.

c) ψ_M jest przekształceniem $\psi_M : Q_M \longrightarrow Y_M$.

7. Uwagi końcowe

Przedstawiona w artykule problematyka stanowi jedynie pewien wycinek szerokiej klasy zagadnień związanych z kreowaniem i interpretacją opisów formalnych systemów złożonych. Niemniej, zaprezentowane sposoby opisu dają już pewne podstawy do tworzenia "bardziej formalnych" projektów oprogramowania symulacyjnego modeli systemów transportowych.

L I T E R A T U R A

[1] AHO A.V., HOPCROFT J.E., ULLMAN J.D.: Projektowanie i analiza algorytmów komputerowych - *PWN, Warszawa 1983* .

[2] BUSLENKO N.P, KAŁASZNIKOW W.W., KOWALENKO I.N.: Teoria systemów złożonych *PWN, Warszawa 1979* .

[3] COHEN B., HARWOOD W.T., JACKSON M.I.: The Specification of Complex Systems. *Addison-Wesley Publishing Company, 1986* .

[4] CYGAN Z., DZIADYKIEWICZ L.: Identyfikacja złożonych systemów transportowych. *Zagadnienia Transportu nr 1/2 1982/1983, Wyd. PAN, Warszawa 1985* .

[5] DĄBROWA-BAJON M.: Modelowanie w zakresie sterowania ruchem kolejowym. *Problemy Kolejnictwa , nr 95, Warszawa 1982* .

[6] HEWITT C., BAKER H.: Actors and Continuous Functionals - *artykuł z tomu: "Formal Descriptions of Programming Concepts". North-Holland Publishing Company , 1978* .

[7] HIPO - A Design Aid and Documentation Technique. *Form GC20-1851 IBM* .

[8] JAROŃ J.: Cele systemu, ich przestrzeń i realizacja - *Zeszyt "Formalne opisy systemów i ich zastosowania". Politechnika Wrocławska 1978*

[9] KALMAN R.E., FALB P.L., ARBIB M.A.: Topics in Mathematical System Theory - *New York: McGraw-Hill 1969* .

[10] KONIECZNY R.: O pewnych konwencjach notacji algorytmów programów komputerowych - *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej , Transport nr 6 / 1988* .

[11] MESAROVIC M.D.: Matematyczna teoria systemów ogólnych - *tom "Ogólna teoria systemów" pod red. G.J. Klira, WNT, Warszawa 1976* .

[12] OREN T.I.: GEST: General System Theory Implementor. A Combined Digital Simulation Language - *Doctoral Dissertation, University of Arizona, Tucson 1971* .

[13] SOKOŁOWSKI J., WYRZYKOWSKI W.: Definicja i opis formalny systemu transportowego. *Zagadnienia Transportu nr 1/2 , wyd. PAN, Warszawa 1977* .

[14] WYMORE A.W.: Spleciona teoria systemów - *tom "Ogólna teoria systemów" pod red. G.J. Klira, WNT, Warszawa 1976* .

[15] ZEIGLER B.P.: Teoria modelowania i symulacji. *PWN, Warszawa 1984* .

[16] БУСЛЕНКО Б.Н.: Моделирование сложных систем. Изд. Наука, Москва 1978

[17] БУСЛЕНКО В.Н.: Унификация описания имитационных моделей в человеко-машинных системах. Сборник научных трудов (Имитационное моделирование в организационно-технических системах). Воронежский политехнический институт. Воронеж 1982

[18] ВАВИЛОВ А.А. (общ. ред.): Имитационное моделирование производственных систем. Москва "Машиностроение" Берлин "Техника", 1983

[19] ИОФФЕ Л.Ш., КЛЕЙНЕР Г.Б., САДОВСКИЙ Л.Е.: Алгебраические методы в теории больших систем (информационных, транспортных, управляющих). Изд. МИИТ, Москва 1976.

SELECTED PROBLEMS OF COMPLEX SYSTEM MODEL FORMAL SPECIFICATION

Summary

The paper makes an attempt of arranging the most important notions and definitions related to the complex system model specification in the aspect of their usefulness for simulation software design.

The aspects of informal and formal specifications of the system model have been considered paying particular attention to the following problems: description variables specification, specification hierarchy and the notion of state. The aspects of the specification of input-output systems, discrete systems in time, differential equations systems and discrete events systems have been discussed. The problems presented in the paper make only certain fragment of a wide class of problems connected with creation and interpretation of the complex systems formal specifications.

Nevertheless, the ways of description presented give some basis for creating "more formal" designs of the simulation software for transport system models.

AUSGEWÄHLTE PROBLEMEN DER FORMALEN BESCHREIBUNG EINES KOMPLIZIERTEN SYSTEMS

Zusammenfassung

Der Aufsatz bildet eine Probe des Ordnungsbringens in die wichtigsten Begriffe und Definitionen die mit der Modellbeschreibung eines Komplizierten Systems verbunden sind, im Aspect ihrer Nützlichkeit für die Projektierung der Simulationssoftware.

Es wurden Aspekte der un- und formalen Beschreibung eines Systemsmodells betrachtet; besondere Aufmerksamkeit wurde dabei folgenden Problemen geschenkt: der Spezifizierung von Beschreibungsvariablen, der Beschreibungshierarchie sowie dem Zustandsbegriff. Es wurden Beschreibungsaspekte der Ein-Ausgangs-Systeme, der zeitlichen diskreten Systeme, der Differentialgleichungssysteme sowie der Systeme diskreter Ereignisse besprochen.

Die im Aufsatz dargestellte Problematik bildet nur ein gewisser Ausschnitt aus breiter Klasse von Problemen, die mit der Bildung und Interpretation formaler Beschreibung von Komplizierten Systemen verbunden sind.

Nichtsdestoweniger geben die dargestellten Beschreibungsweisen schon gewisse Grundlagen zur Bildung von "formaleren" Projekten der Simulationssoftware für Modelle von Transportsystemen.

ИЗБРАННЫЕ ВОПРОСЫ ФОРРМАЛНОГО ОПИСАНИЯ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ СИСТИЕМЫ

Резюме

В статье дается попытка упорядочения важнейших понятий и определений связаных с описанием модели сложной системы с точки зрения проектирования симуляционного опраграмирования. Оговорены аспекты неформального описания а также формального описания модели системы, обращая особое внимание на следушее вопросы: спецификацю описыбающих переменных, иерархию описания а также панятие состаяния. Оговорены аспекты описания систем типа вход-выход, дискретных по времени систем, систем дифференцияльных управлений а также систем дискретных событый.

Представленная в статье проблематика является лишь частью широкого класса вопросов, связаных с конструкцией и интерпретацией формального описания сложных систем. Тем немение представленные способы описания дают уже некоторые основы для получения "более формальных" проектов опраграммирования симуляционных модели транспортных систем.