

Magdalena Torcńska-Łuczyńska  
Politechnika Śląska

## WYKORZYSTANIE MODELOWANIA CYFROWEGO DO STEROWANIA PROCESEM KUCIA

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono możliwość wykorzystania modelowania cyfrowego do wyznaczania optymalnego sterowania dyskretnymi procesami technologicznymi w zakładach o wieloasortymentowej produkcji na przykładzie procesu kuźniczego.

### 1. Wprowadzenie

Proces produkcyjny kucia matrycowego to typowy proces wytwórczy, którego celem jest realizacja określonych zadań produkcyjnych. Jeżeli założymy, że wymagania jakościowe stawiane wyrobom finalnym tego procesu są spełnione w wyniku przestrzegania norm technologicznych, to celem sterowania takim procesem jest zapewnienie realizacji tych zadań, a celem optymalizacji jest wyznaczenie takiego sterowania, dla którego wskaźnik jakości procesu osiągałby ekstremum. Uwzględniając, że na proces oddziałują różne zakłócenia, których predyktowność jest mała / o ile w ogóle możliwa, konieczne jest utworzenie układu sterowania, który zapewniłby osiągnięcie ekstremum wskaźnika jakości w obecności zakłóceń. Realizacja praktyczna takiego układu sterowania wymaga: określenia optymalizatora, czyli algorytmu wyznaczającego sterowanie optymalne w oparciu o model procesu i określenia struktury układu sterowania, rozumianej jako sposób powiązania procesu z optymalizatorem.

W referacie pokazana zostanie możliwość wykorzystania metody symulacji cyfrowej do wyznaczania optymalizatora.

### 2. Opis procesu i obiektu

Proces kucia matrycowego to technologiczny proces obróbki plastycznej, którego produkt wyjściowy, tzw. "odkuwki", stanowią detale o określonych wymiarach, kształcie i właściwościach materiałowych, czyli o określonym asortymencie. Proces ten można uważać za zbiór kolejno następujących po sobie operacji technologicznych, przy czym realizacja poszczególnych asortymentów nie wymaga wykonywania wszystkich operacji.

**Określenie 1:** Operacją technologiczną nazywa się czynność lub kilka czynności wykonywanych nad materiałem wejściowym lub półwyrobem, przy użyciu pojedynczego urządzenia, w wyniku zadziałania którego ulega zmianie określony parametr materiału przetwarzanego.

Proces produkcyjny kucia matrycowego charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- a/ szerokim i różnorodnym asortymentem odkuwek, ze względu na co do wykonywania każdej operacji przeznaczony jest w kuźni zbiór różnych typów urządzeń, przy czym liczba urządzeń w poszczególnych typach zależy od rozmiaru produkcji;
- b/ możliwością wykonywania różnych operacji na tym samym zbiorze typów urządzeń;
- c/ brakiem ciągów technologicznych w procesie, rozumianych w tym sensie że wspólny dla danego zbioru asortymentów typ urządzenia, na którym wykonuje się operację poprzednią, nie determinuje wspólnego dla tego zbioru asortymentów typu urządzeń przeznaczonych do wykonywania operacji następnej;
- d/ następstwem czasowym operacji, które nie determinuje jednoznacznie czasu rozpoczęcia operacji następnej w stosunku do operacji poprzedniej, a określa jedynie, że operacja następna może się rozpocząć nie wcześniej niż zostanie zakończona operacja poprzednia dla pewnej liczby elementów danego asortymentu tzw. kwantu.



e/ istnieniem w kuźni magazynów: wejściowego, międzyoperacyjnego i wyjściowego w których przechowywane są odpowiednio: materiał wejściowy, półwyroby pomiędzy kolejnymi operacjami i wyroby finalne ;

f/ czynnym uczestnictwem w procesie człowieka tzw. "dyspozytora", którego decyzje determinują przebieg procesu produkcyjnego.

**Określenie 2:** Przez przebieg procesu produkcyjnego rozumie się przebiegi wszystkich procesów składowych. Do oceny przebiegu procesu jest wykorzystywany harmonogram dostaw wyrobów finalnych do magazynu wyjściowego.

**Określenie 3:** Przez przebieg procesu składowego rozumie się przebieg procesu na pojedynczym urządzeniu, który wyznaczony jest ciągiem momentów rozpoczęcia i zakończenia realizacji operacji, do wykonywania której to urządzenie jest przeznaczone, dla wszystkich zamówień objętych zadaniem produkcyjnym i wymagających wykorzystywania urządzenia tego typu.

**Określenie 4:** Przez zadanie produkcyjne rozumie się dla procesu kucia zbiór zamówień, które należy zrealizować w danym przedziale czasu, z których każde jednoznacznie określone jest: asortymentem odkuwek, liczbą sztuk i nieprzekraczalnym terminem realizacji.

Z identyfikacji procesu kucia wynika, że proces ten jako obiekt sterowania charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- a/ jest procesem złożonym, na który składają się procesy zachodzące na poszczególnych urządzeniach,
- b/ mechanizm wewnętrzny każdego z procesów składowych można opisać dwoma istotnie różniącymi się stanami: postępu lub przetwarzania, przy czym w danej chwili czasu może odbywać się przetwarzanie materiału przeznaczonego na jeden konkretny asortyment. Zmianie asortymentu towarzyszy wymiana narzędzia na właściwe dla nowego asortymentu. Mechanizm wewnętrzny procesu składowego nie wyznacza przebiegu tego procesu.
- c/ związki pomiędzy procesami składowymi wynikające z przepływu materiału i technologii wyznaczają pewne ograniczenia konieczne do spełnienia przez procesy składowe, by mogły one zachodzić, ale również nie wystarczają w praktyce do wyznaczenia tych przebiegów,
- d/ ścisłym powiązaniem procesu technologicznego z procesem kierowania, co jest uwzględnione w decyzjach dyspozytora, które determinują ostateczny przebieg procesów składowych, a są podejmowane zarówno w oparciu o ograniczenia wynikające z technologii jak i inne ograniczenia nie związane bezpośrednio z technologią procesu.

### 3. Model symulacyjny procesu produkcyjnego kucia

#### 3.1. Założenia

Algorytm symulacyjny zbudowany został przy następujących ustaleniach wynikających z rozpoznania procesu:

- a/ znane są typy i liczba urządzeń w poszczególnych typach,
- b/ dla każdego urządzenia znane są: normatywne czasy pracy pomiędzy remontami, normatywne czasy trwania remontów, współczynniki wykonywania normy,
- c/ dla każdego asortymentu znane są: liczba, rodzaj i sposób wykonywania operacji, typy urządzeń, na których każda operacja ma być wykonywana, normatywne czasy wykonywania operacji, normatywne żywotności narzędzi, normatywne liczebności kwantów, normatywne czasy transportu pomiędzy urządzeniami, normatywne czasy wymiany narzędzi,
- d/znane są plany dostaw materiału wejściowego dla procesu,
- e/ znany jest rozkład absencji załogi i awarii urządzeń w poszczególnych dniach tygodnia,
- f/ znane jest planowane zadanie produkcyjne,
- g/ dostępna jest / przynajmniej co pewien określony czas / informacja typu operacyjnego o aktualnym stanie zakładu np: o stanie zapasów w magazynach, sprawny park maszynowy itd.
- h/ określony jest cel optymalizacji sterowania : " Wyznaczyć taki przebieg procesów składowych, by przebieg całego procesu produkcyjnego, do oceny którego wykorzystuje się harmonogram dostaw wyrobów finalnych z procesu do magazynu końcowego, był optymalny, to znaczy taki, który zapewniłby minimalny czas realizacji zadania produkcyjnego pod warunkiem nieprzekroczenia dla żadnego zamówienia terminu oddania gotowej produkcji, a w przypadku niespełnienia tego warunku, by straty ponoszone na skutek płaćenia kar umownych były minimalne.
- i/ znany jest zbiór warunków, które uwzględnia dyspozytor przy podejmowaniu decyzji.



### 3.2. Algorytm symulacyjny procesu kucia.

#### 3.2.1. Założenia metody symulacji cyfrowej.

Do wyznaczenia modelu procesu produkcyjnego kucia matrycowego wyko-  
rzystano metodę symulacji cyfrowej. Istota tej metody polega na takim  
przedstawieniu procesu / skonstruowaniu takiego algorytmu symulacyjnego /,  
b/ dowolna chwila  $t$  i stan  $x$  procesu w chwili  $t$  wyznaczały chwilę  
 $t$ , do której proces pozostaje w stanie  $x$  i następny stan  $\bar{x}$ . Algorytm symu-  
lacyjny można zatem przedstawić jako dwójkę  $M = (S, F)$ , gdzie:  $S = T \times X$   
uogólniony zbiór stanów procesu,  $T$  - zbiór dyskretnych chwil czasu rep-  
rezentujący momenty zmian stanów procesu,  $X$  - zbiór stanów procesu,  
 $F$  - funkcja przejścia do stanu następnego.

Z identyfikacji procesu wynika, że można go uważać za proces złożony  
z procesów składowych. Oznacza to, że stan procesu determinuje stany  
procesów składowych, a każda zmiana stanu procesu jest spowodowana zmia-  
ną stanu procesu składowego i jest wyznaczona przez zmianę stanu tego  
procesu. W algorytmie symulacyjnym fakt, że symulowany proces jest zło-  
żony, przejawia się w tym, że algorytm ten konstruujemy w postaci tzw.  
"algorytmu systemu sterowanego" rodziny algorytmów procesów składowych,  
tzn.:  $(S, F) = M(\Sigma, \mu)$ , gdzie:  $(\Sigma, \mu)$  - para zwana systemem sterowanym  
wyznaczająca algorytm procesu złożonego,  $\Sigma = (S, \{f_{i, k, m}\}_{i \in M, k \in M})$  - struk-  
tura relacyjna procesu,  $S$  - zbiór uogólnionych stanów procesu,  $\{f_{i, k, m}\}$   
zbiór operacji określających działanie procesów składowych /wyznaczają-  
cych stan następnego procesu w wyniku zadziałania i-tego procesu składowe-  
do/,  $\mu$  - funkcja wyznaczająca działający proces składowy.  
Algorytm symulacyjny procesu kucia skonstruowano wyznaczając kolejno:  
procesy składowe, zmienne stanów procesów składowych, operacje opisujące  
działania procesów składowych, funkcję wyznaczającą działający proces.

#### 3.2.2. Dekompozycja procesu produkcyjnego

Z analizy procesu produkcyjnego kucia wynika, że celowy jest taki pod-  
ział tego procesu na składowe, by każdy z procesów składowych obejmował  
proces zachodzący na pojedynczym urządzeniu. W związku z tym w modelu  
każde urządzenie reprezentowane jest przez tzw. agregat. Zbiór wszyst-  
kich agregatów oznaczono jako

$$W_u = \{w_1^u, w_2^u, \dots, w_M^u\}$$

Agregaty te pogrupowano w typy analogicznie jak urządzenia w procesie.  
Zbiór wszystkich typów można przedstawić w postaci

$$W_t = \{W_i^t\}_{i=1 \dots I} \quad \text{taki że } \bigwedge_{i \in I} W_i^t \in W_t; \quad W_i^t = \{w_j^t\}_{j \in M_i}$$

gdzie:  $M$  - zbiór indeksów agregatów,  $M_i$  - zbiór indeksów agregatów odpo-  
wiadających  $i$ -temu typowi,  $I$  - zbiór indeksów typów agregatów.

Procz urządzeń w procesie kucia występują również magazyny. Uwzględ-  
nienie w modelu procesów w nich zachodzących jest konieczne, ale nie mu-  
szą one stanowić oddzielnych procesów składowych, o ile da się je powią-  
zać z procesami składowymi na urządzeniach.

Aby się o tym przekonać, zauważmy, że jeżeli:

$$W_a = \{w_1^a, w_2^a, \dots, w_P^a\} \quad \text{jest zbiorem asortymentów}$$

$$W_o = \{w_1^o, w_2^o, \dots, w_N^o\} \quad \text{jest zbiorem operacji technologicznych}$$

$$W_t = \{W_i^t\}_{i=1 \dots I}$$

to relacja  $R \subset W_a \times W_o \times W_t$  stanowi zapis technologii produkcji poszcze-  
gólnych asortymentów, której w modelu odpowiada tablica koincydencji  
 $s_{i, j, k} / i=1 \dots P, j=1 \dots N, k=1 \dots I /$  określona bezpośrednio z procesu  
w taki sposób że:  $(w^a, w^o, w^t) \in R \iff s_{i, j, k} = 1$ .

Relacja ta spełnia oczywiście warunek:

$$\bigwedge_{w^a \in W_a} \bigwedge_{w^o \in W_o} \bigwedge_{w^t \in W_t} \left[ R(w^a, w^o, w^t) = 1 \wedge i \neq j \Rightarrow R(w^a, w^o, w^t) = 0 \right]$$

oznaczający, że dla danego asortymentu daną operację można wykonać tylko



na jednym typie urządzeń. W zbiorze  $R$  można określić relację  $\varphi$  zdefiniowaną następująco:

$r_1 \varphi r_2$  gdy  $f(r_1) = f(r_2)$  gdzie  $f: W_a \times W_o \times W_t \rightarrow W_o \times W_t$ , taką, że:

$$\bigvee_{u^a, u^o, u^t \in W} \{ (u^a, u^o, u^t) \in R \text{ to } f(u^a, u^o, u^t) = (u^o, u^t) \}$$

Można wykazać, że relacja ta jest relacją równoważności określoną w  $R$  i dzieli ten zbiór na klasy abstrakcji tej relacji. Wyznaczony tą relacją zbiór wszystkich klas równoważności

$$R|_a = \{ [u^a, u^o, u^t]_{j \in M} \}$$

implikuje w zbiorze  $W$  podzbiory  $\{W_{a,s}\}$  dla  $s=1..S$  charakteryzujące się tym, że dla asortymentów wchodzących w skład jednego podzbioru wspólna jest operacja następna i wspólny typ urządzeń, na którym tę operację można wykonać.  $S$ - zbiór indeksów podzbiorów wyznaczonych relacją.

Uwzględniając, że dowolny materiał znajdujący się w magazynie rzeczywistym musi mieć określony: asortyment, na który jest przeznaczony, operację następną i typ urządzenia, na którym tę operację należy wykonać, można przyjąć, że każda klasa abstrakcji determinuje w modelu tzw. "magazyn elementarny" przez określenie asortymentów wchodzących w ich skład, oraz że wszystkie magazyny elementarne stanowią odpowiednik magazynów rzeczywistych z procesu.

Wprowadzenie magazynów elementarnych umożliwiło zdekomponowanie procesu produkcyjnego na procesy składowe w taki sposób, że proces składowy obejmuje proces zachodzący na agregacie, oraz proces w magazynie elementarnym znajdującym się przed tym typem urządzeń, do którego dane urządzenie jest zaliczane.

### 3.2.3. Określenie stanu procesu kucia

Stan procesu kucia jest zdeterminowany stanem wszystkich agregatów i magazynów elementarnych i można go przedstawić w postaci:

$$X \subset \{X_i^u\}_{i=1..M} \times \{X_s^m\}_{s=1..S}$$

gdzie:  $M$  - zbiór indeksów agregatów,  $S$  - zbiór indeksów magazynów elementarnych, przy czym para  $(X_i^u, X_s^m)$  należy do zbioru stanów wtedy i tylko wtedy, jeżeli  $s$ -ty magazyn elementarny znajduje się przed tym typem agregatów, do którego należy  $i$ -ty agregat.

$$X_i^u \in \{X_{a_1, i}^u \times X_{a_2, i}^u \times \dots \times X_{a_n, i}^u\}$$

jest zbiorem stanów  $i$ -tego agregatu.

W danej chwili czasu  $t$  stan każdego agregatu opisany jest ciągiem

$$x_i^u(t) = (x_{a_1, i}^u, x_{a_2, i}^u, \dots, x_{a_n, i}^u)$$

$x_{a_1, i}^u$  - czas jaki pozostał do zmiany stanu agregatu,

$x_{a_2, i}^u, \dots, x_{a_n, i}^u$  - parametry opisujące przetwarzany materiał np. termin rozpoczęcia przetwarzania, asortyment, ilość przetwarzanego materiału

$x_{a_1, i}^m, \dots, x_{a_1, i}^m$  - parametry i zmienne opisujące agregat np. termin najbliższego remontu, normatywny czas trwania remontu itd.

$$X_s^m \in \{X_{a_1, j, s}^m \times X_{a_2, j, s}^m \times \dots \times X_{a_2, j, s}^m\}_{j=1..P(s)}$$

jest zbiorem stanów  $s$ -tego magazynu elementarnego.

W danej chwili czasu  $t$  stan każdego magazynu opisany jest ciągami

$$x_{s, j}^m(t) = (x_{a_1, j}^m, \dots, x_{a_2, j}^m)$$

$x_{a_1, j}^m$  - asortyment półwyrobu, który znajduje się w magazynie,

$x_{a_2, j}^m$  - liczba sztuk półwyrobów danego asortymentu znajdujących się w magazynie,

$x_{a_3, j}^m$  - czas dostarczenia półwyrobów do magazynu,

$x_{a_4, j}^m, \dots, x_{a_2, j}^m$  - parametry charakteryzujące proces przetwarzania półwyrobów przeznaczonych na dany asortyment odkuwek na agregacie za danym magazynem elementarnym np: czas przebrojenia, nominalny czas trwania operacji itd.



3.2.4. Wyznaczenie operacji opisujących działanie procesów składowych.

Operacje opisujące działanie procesów składowych determinują czas zmiany stanu oraz stan następny procesu w wyniku zadziałania i-tego procesu składowego. Aby je wyznaczyć, należy zauważyć, że jeżeli w chwili  $t$  proces kucia znajduje się w stanie  $x$ , to i-temu procesowi składowemu odpowiada stan  $x_i$ . Niech w chwili  $t > t$  zmieni się stan i-tego procesu składowego, to również w chwili tej zmieni się stan całego procesu. Chwilę  $t$  można wyznaczyć jako  $t = \tau_i(x, t)$ , gdzie  $\tau_i$  - funkcja określająca czas zmiany stanu i-tego procesu składowego. Dla procesu kucia funkcja ta wyznacza czas zakończenia przetwarzania partii materiału na urządzeniu lub zakończenie przestoju urządzenia.

Nowy stan  $\bar{x}$  procesu jest wyznaczony:

a/ nowym stanem  $\bar{x}_i$  i-tego procesu składowego  $\bar{x}_i = \Phi_i(x, t)$ , gdzie  $\Phi_i$  funkcja określająca nowy stan i-tego procesu składowego. Dla procesu kucia jest ona określona w oparciu o algorytm heurystyczny formalizujący decyzje operatorskie. Idea działania tego algorytmu polega na tym, że w chwili  $t = t$  oceniane są aktualne wartości zmiennych opisujących stan procesu, w wyniku czego następuje wyznaczenie nowego stanu i-tego procesu składowego. Ze względu na to, że algorytm podejmowania decyzji operatorskich potraktowany został w modelu jako integralna część symulowanego procesu, to wszystkie dane, z których korzysta operator, nawet te, które nie są bezpośrednio związane z procesem technologicznym, zostały wprowadzone do modelu jako zmienne stanu.

Istotną cechą wykorzystywanego algorytmu heurystycznego jest to, że w świetle przeprowadzanej oceny dopuszcza on istnienie kilku różnych stanów możliwych do przyjęcia jako stanu następnego i-tego procesu składowego. W związku z tym konieczne jest tylukrotne symulowanie procesu, by każdy ze stanów dopuszczalnych jako następny (był stanem następnym i-tego procesu składowego. Ten fakt jest przyczyną powstawania "zbioru sterowań dopuszczalnych". Wybór konkretnego sterowania jest możliwy dopiero w wyniku optymalizacji.

b/ zmianą stanów innych procesów składowych spowodowaną zmianą stanu i-tego procesu.

Ostatecznie, uogólniony stan następny procesu można określić jako:

$$(\bar{x}, \bar{t}) = \bar{f}_i(x, t)$$

gdzie:  $\bar{f}_i$  - funkcja opisująca uogólniony stan następny procesu w wyniku zadziałania i-tego procesu składowego.

3.2.5. Określenie funkcji wyznaczającej działający proces składowy.

Proces kucia matrycowego składa się z  $M$  procesów składowych. Jeżeli czas najbliższej zmiany stanu każdego z procesów składowych wyznaczony jest przez  $\tau_i(t, x)$ , to czas najbliższej zmiany stanu procesu można wyznaczyć jako:

$$\bar{t} = \min_{i \in M} (\tau_i(t, x))$$

Odpowiada to zmianie stanu obiektu  $i = \mu(t, x)$ , dla którego  $\tau_i = \bar{t}$ . Stan następny procesu jest wówczas wyznaczony funkcją

$$F = f_{i, \mu(t, x)}(t, x) = f_{\mu(t, x)}(t, x)$$

gdzie:  $\mu(t, x)$  funkcja wyznaczająca działający proces składowy.

Uwaga. Ze względu na ograniczoną objętość referatu funkcje  $\{\bar{f}_i\}_{i \in M}, \mu(t, x)$  nie są przedstawione.

3.3. Formalizacja kryterium optymalizacji:

Niech  $W_a = \{w_1^a, w_2^a \dots w_n^a\}$  — oznacza zbiór asortymentów,  
 $W_b = \{w_1^b, w_2^b \dots w_n^b\}$  — oznacza zbiór licznosci zamówień,  
 $W_c = \{w_1^c, w_2^c \dots w_n^c\}$  — oznacza zbiór dyskretnych chwil czasu,  
 reprezentujący nieprzekraczalne terminy dostaw zamówień do magazynu



końcowego. Zadanie produkcyjne można wówczas określić jako relację :

$$Z \subset W_a \times W_b \times W_c$$

W modelu relacja ta jest określona tablicą o wymiarach  $P_1 \times 3$ , w której wiersze odpowiadają zamówieniom, pierwsza kolumna oznacza asortyment, druga licznosc a trzecia nieprzekraczalny termin realizacji każdego z zamówień.  $P_1$  - liczba zamówień w zadaniu produkcyjnym.

Niech :

$W_a = \{w_1^a, w_2^a, \dots, w_{P_1}^a\}$  — oznacza zbiór asortymentów,  
 $W_b = \{w_1^b, w_2^b, \dots, w_{P_1}^b\}$  — oznacza zbiór licznosci porcji,  
 wg. których realizowane są zamówienia

$W_c = \{w_1^c, w_2^c, \dots, w_{P_1}^c\}$  — oznacza zbiór dyskretnych chwil

czasu odpowiadający momentom dostarczania kolejnych partii zamówień do magazynu końcowego. Harmonogram dostaw do magazynu końcowego można wówczas przedstawić jako relację

$$H_l \subset W_a \times W_b \times W_c$$

gdzie:  $l=1 \dots L$  wariant sterowania.

W modelu relacja ta jest zdeterminowana tablicą tworzoną podczas symulacji o wymiarach  $P_1(1) \times 3$ , w której wiersze odpowiadają porcjom wyrobów kolejno spływających do magazynu końcowego, kolumna pierwsza oznacza asortyment, druga licznosc a trzecia termin dostarczenia każdej porcji.  $P_1(1)$  - oznacza liczbę porcji, w ilu zrealizowano zadanie produkcyjne. W zależności od sterowań otrzymuje się różne harmonogramy, których zbiór

$$H = \{H_l\}_{l=1 \dots L}$$

wyznacza zbiór harmonogramów dopuszczalnych, z którego wyznacza się harmonogram optymalny.

Dla sformalizowania kryterium optymalizacji wprowadza się funkcję  $g_1$ , która przekształca każdy z harmonogramów  $H_l$  na dwójkę  $(w^c, k)_l$ , w której pierwszy element reprezentuje czas wykonania zadania produkcyjnego, a drugi koszt kar umownych za nie zrealizowane w terminie zamówienia.

Funkcja ta jest założeniem funkcji  $g_1$  i  $g_2$  określonych następująco:  
 Niech  $H = \{H_l\}_{l=1 \dots L}$  jest zbiorem harmonogramów,

$$H_l = \{(w^a, w^b, w^c)_i\}_{i=1 \dots P_1(l)} = \{(h_l)_i\}_{i=1 \dots P_1(l)}$$

jest  $l$ -tym harmonogramem, wówczas

$H^1 = \{H^1_l\}_{l=1 \dots L}$  jest zbiorem harmonogramów zredukowanych, którego każdy element

$$H^1_l = \{g_1(h_l)\} = \{(h^1_l)_i\}_{i=1 \dots P_1(l)}$$

otrzymano przez przekształcenie  $g_1: H_l \rightarrow H^1_l$  , takie że:

$$g_1(h_l)_i = \begin{cases} (w^a, w^b, w^c)_j & \text{jeżeli } \bigvee_{(w^a, w^b, w^c)_j \in H_l} \bigvee_{(w^a, w^b, w^c)_k \in H_l} \{ (j \neq i) \wedge (w_j^a \neq w_k^a) \} \\ (w^a, w^b, w^c)_i & \text{jeżeli } \bigvee_{(w^a, w^b, w^c)_j \in H_l} \bigvee_{(w^a, w^b, w^c)_k \in H_l} \{ (j \neq i) \wedge (w_j^a = w_k^a) \} \\ & \text{to } \bigwedge_{(w^a, w^b, w^c)_k \in H_l} \{ (w_i^a = w_k^a) \wedge (w_{j^*}^c > w_i^c) \} \end{cases}$$

Funkcja  $g_2$  określona jest następująco :

$$g_2(H_l) = \begin{cases} (\max_j (w_j^b); 0) & \text{jeżeli } \bigwedge_{(w^a, w^b, w^c)_j \in H_l} \bigwedge_{(w^a, w^b, w^c)_i \in \bar{Z}} \{ (w_j^a = w_i^a) \wedge (w_i^c \leq w_j^c) \} \\ (0; \sum_{i \in \bar{Z}} k_i (w_i^b - w_i^c)) & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases}$$



gdzie:  $I^*$  - zbiór indeksów tych zamówień, dla których przekroczony został termin realizacji;  
 $k_i$  - współczynniki kosztów jednostkowych i-tego zamówienia związane z przekroczeniem terminu realizacji zamówienia.

Harmonogramem optymalnym jest wówczas ten, dla którego zachodzi:

$$H_i H_{i'} = H_{opt} \Leftrightarrow \begin{cases} \bigvee_{l' \in L} \bigwedge_{l \in L} \{ (l' + l) \wedge (k_{l'} = 0) \wedge (k_l \neq 0) \} \\ \bigvee_{l' \in L} \bigvee_{l \in L} \{ \bigwedge_{l_1 \in L} (l' + l_1) \wedge (k_{l'} = k_{l_1} = \min_{l_1} (k_{l_1})) \wedge (w_{l'}^d = \min_{l_1} w_{l_1}^c) \} \end{cases}$$

Jeżeli istnieje kilka harmonogramów, które spełniają drugi warunek, wówczas są one równoważne względem podanego kryterium optymalizacji.

#### 4. Uwagi i wnioski końcowe

W przedstawionym referacie wykazano, że wykorzystanie metody symulacji cyfrowej do optymalizacji sterowania procesem kucia jest możliwe. Równie ważne jest jednak wykazanie, że stosowanie tej metody jest celowe. Aby tego dowiedzieć, zauważmy; że charakterystyczną cechą procesu kucia jest to, że optymalizacja sterowania tym procesem sprowadza się do optymalizacji przebiegów procesów składowych, to znaczy do optymalizacji decyzji podejmowanych przez dyspozytora w stosunku do każdego urządzenia odnośnie tego: co, ile i w którym momencie należy na tym urządzeniu robić. Równocześnie dyspozytor w momencie podejmowania decyzji dysponuje tylko takimi informacjami, które umożliwiają mu wyznaczenie tzw. "decyzji racjonalnych", to znaczy niesprzecznych z ograniczeniami wynikającymi z technologii procesu i sposobu kierowania produkcją. W przypadku kiedy istnieje kilka racjonalnych równorzędnych decyzji możliwych do podjęcia, ze względu na złożoność procesu nie jest w stanie powiedzieć, która z nich jest najlepsza, gdyż skutek podjętej decyzji jest możliwy do oceny dopiero po zakończeniu realizacji całego zadania produkcyjnego. Inną zaletą tej metody to stosunkowo łatwe przejście z algorytmu symulacyjnego formalizującego proces, którego obliczenia stanowią model symulacyjny na program obliczeniowy poprzez zapisanie relacji tablicami koincydencji, a operacji i funkcji tablicami decyzyjnymi.

#### LITERATURA

- [1] W. Findeisen - Wielopoziomowe układy sterowania - PWN Warszawa 1974
- [2] Z. Bubnicki - Identyfikacja obiektów sterowania - PWN Warszawa 1974
- [3] J. Winkowski - Programowanie symulacji procesów - PWN Warszawa 1974
- [4] G. Gordon - Symulacja systemów - WNT Warszawa 1974
- [5] A. Korbut J. Finkelsztejn - Programowanie dyskretne - PWN W-wa 1974
- [6] H. Rasiowa - Wstęp do matematyki współczesnej - PWN W-wa 1975
- [7] A. Gościński - Modelowanie złożonych dyskretnych procesów produkcyjnych Archiwum Automatyki i telemekhaniki PWN W-wa 1974

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ШТАМПОВКИ

#### Резюме

В работе представлена возможность использования цифрового моделирования для определения оптимального управления дискретными технологическими процессами на предприятиях выпускающих многоассортиментную продукцию на базе процесса штамповки.



APPLICATION OF DIGITAL COMPUTERS SIMULATION  
METHODS FOR STEERING THE PROCESS OF FORGING

S u m m a r y

In this paper the digital computers simulation methods in optimal control of the uncontinuous processes are discussed. Example of using these methods is shown.