ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988
Seria: AUTOMATYKA z.95 Nr kol.971

Jerzy Józefczyk
Politechnika Wrocławska

PEWIEN PROBLEM STEROWANIA NADRZĘDNEGO DYSKRETNYMI PROCESAMI PRODUKCJI NA PRZYKŁADZIE PROCESU ZGRZEWANIA OBUDOWY PRALKI AUTOMATYCZNEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono pewien problem sterowania nadrzędnego dyskretnymi procesami produkcji. Zaprezentowano metodę jego rozwiązania. Bardziej szczegółowo rozważono przykład praktyczny zgrzewania obudowy pralki automatycznej. Zamieszczono wyniki badań symulacyjnych wybranego problemu z zakresu sterowania nadrzędnego.

1. Wstęp

Teoretyczna i techniczna problematyka sterowania dyskretnymi procesami produkcji jest szczególnie aktualna. Jest to związane głównie z szybkim rozwojem techniki mikrokomputerowej oraz z coraz szerszą dostępnością i uniwersalnością robotów przemysłowych. Prezentowana praca dotyczy sterowania nadrzędnego dyskretnymi procesami produkcji, a rozważania są zilustrowane na przykładzie procesu zgrzewania obudowy pralki automatycznej. Stosowana metoda sterowania nawiązuje do wcześniejszych prac prowadzonych w Instytucie Sterowania i Techniki Systemów Politechniki Wrocławskiej [np. 1], a dotyczących sterowania kompleksami operacji o zasobach lub zadaniach o charakterze ciągłym. Wspólnym mianownikiem tych prac jest dekompozycja zadania sterowania na dwie części: sterowanie kompleksem operacji produkcyjnych uwzględniającym powiązania czasowe pomiędzy nimi oraz sterowanie wykonywaniem poszczególnych operacji.
W rozdziale 2. sformułowano rozważany problem sterowania oraz przedstawiono metodę jego rozwiązania. Rozdział 3. zawiera opis przykładu praktycznego, który ilustruje stosowaną metodę sterowania, a także prezentuje wyniki badań symulacyjnych wybranego problemu z zakresu sterowania nadrzędnego. Rozważania podsumowują uwagi końcowe, które są zamieszczone w rozdziale 4.

2. Sformułowanie problemu. Metoda rozwiązania

Dyskretny proces produkcji, będący przedmiotem rozważań, jest traktowany jako kompleks operacji obejmujący strukturę i charakterystykę operacji. Struktura kompleksu określona jest uwarunkowaniami czasowymi związanymi z kolejnością czasową operacji, uwzględniającą wymogi technologiczne. Operacja jest rozumiana jako każda czynność wykonywana na wytwarzanym w rozważanym procesie produkcji obiekcie wraz z niezbędnymi czynnościami dodatkowymi,

Praca była częściowo finansowana przez CPBP nr 02.15 "Rozwój badań systemowych i ich priorytetowych zastosowań".

jak np. pobranie, przemieszczenie i zamontowanie obiektu i kontrola. Do wykonania każdej operacji są potrzebne: realizatory, czyli podmioty wykonujące określony rodzaj operacji, narzędzia, czyli "końcowe elementy" organu wykonawczego niezbędne do wykonania operacji przez realizatory oraz zasoby dodatkowe, czyli dodatkowe materiały i ewentualnie energia potrzebne do realizacji operacji. Operacja może wymagać użycia więcej niż jednego realizatora bądź realizatory mogą wykonywać operacje równolegle. Wtedy wygodnie jest wyodrębnić je w postaci stanowiska.

W celu formalizacji zadania sterowania nadrzędnego dyskretnymi procesami produkcji wprowadźmy następujące oznaczenia:

N - długość serii produkcyjnej (liczba produkowanych obiektów),

ν - kolejny produkowany obiekt, $\nu = 1,2,\ldots,N$,

$\mathcal{K} = \{1,2,\ldots,K\}$ - zbiór operacji do wykonania, $k \in \mathcal{K}$ - operacja,

$\mathcal{L} = \{1,2,\ldots,L\}$ - zbiór stanowisk $l \in \mathcal{L}$ - stanowisko,

$\mathcal{W}_l = \{1,2,\ldots,W_l\}$ - zbiór realizatorów na l-tym stanowisku, w_l - realizator na l-tym stanowisku,

Γ - graf określający kolejności czasowe wykonywania operacji,

$\Gamma \triangleq \{(k,m) \in \mathcal{K} \times \mathcal{K} : (k,m)$ oznacza, że operacja m może się rozpocząć po zakończeniu operacji $k\}$,

Π - odwzorowanie określające, na jakich stanowiskach mogą być realizowane operacje ze zbioru $\mathcal{K}$, $\Pi : \mathcal{L} \times \mathcal{K} \to \{0,1\}$, $\Pi(l,k) = 1(0)$ oznacza, że operacja k może (nie może) być realizowana na l-tym stanowisku,

$t_{w_l,k}$ - czas wykonywania k-tej operacji przez w_l-ty realizator,

τ_k - moment zakończenia wykonywania k-tej operacji liczony od początku procesu,

$\hat{t}_{l,k}$ - czas obsługi k-tej operacji na l-tym stanowisku,

n - takt sterowania, $n = 1,2,\ldots$,

$\hat{\mathcal{K}}^n \subset \mathcal{K}$ - zbiór operacji wykonywanych w n-tym takcie sterowania,

$T^n = \min\{\tau_k\}$ - najwcześniejszy moment zakończenia wykonywania operacji ze zbioru $\hat{\mathcal{K}}^n$,

$\Delta^n = T^n - T^{n-1}$ - długość taktu sterowania,

$T = \max_{k \in \mathcal{K}}\{\tau_k\}$ - moment zakończenia wykonywania ostatniej operacji

$k'^n(\nu) \in \hat{\mathcal{K}}^{n-1}$ - operacja, której realizacja została zakończona w n-tym takcie dla ν-tego produkowanego obiektu,

$\mathcal{K}^n(\nu) \subset \mathcal{K}$ - zbiór tych operacji, które godnie z grafem Γ mogą być wykonywane po operacji $k'^n(\nu)$,

$k^n(\nu)$ - operacja, którą w n-tym takcie przydzielono do wykonania na pewnym stanowisku dla ν-tego produkowanego obiektu,

$\tilde{\mathcal{K}}(\nu) \subset \mathcal{K}$ - zbiór tych operacji, które dla ν-tego obiektu mogą być wykonane jako pierwsze,

σ_l^n - stan l-tego stanowiska w n-tym takcie, $\sigma_l^n = 0(1)$ oznacza stanowisko niedostępne (dostępne),

$\mathcal{L}^n \subset \mathcal{L}$ - zbiór stanowisk, które są dostępne w n-tym takcie,

$\tilde{\mathcal{L}} \subset \mathcal{L}$ - zbiór stanowisk mogących wykonywać zadania ze zbioru $\tilde{\mathcal{K}}(\nu)$,

$\mathcal{L}_k^n \subset \mathcal{L}^n$ - zbiór stanowisk, na których w n-tym takcie może być wykonywana k-ta operacja,

$\mathcal{K}_l^n \subset \mathcal{K}$ - zbiór operacji przydzielonych do wykonania na l-tym stanowisku i w n-tym takcie czekających na obsługę,

D^n - algorytm przydziału w n-tym takcie operacji ze zbioru $\mathcal{K}^n(\nu) \setminus \tilde{\mathcal{K}}^n(\nu)$ do wykonania na stanowiskach ze zbioru $\mathcal{L}^n$, $D^n(l,k(\nu)) = 1(0)$ oznacza, że w n-tym takcie $k(\nu)$ - ta operacja została (nie została) przydzielona do wykonania na l-tym stanowisku,

$\tilde{D}^n$ - algorytm przydziału w n-tym takcie operacji ze zbioru $\tilde{\mathcal{K}}^n(\nu)$ do wykonania na stanowiskach ze zbioru $\tilde{\mathcal{L}}^n$, $\tilde{D}^n(\tilde{l},\tilde{k}(\nu)) = 1(0)$ oznacza, że $\tilde{k}(\nu)$-ta operacja w n-tym takcie została (nie została) przydzielona do wykonania na $\tilde{l}$ - tym stanowisku,

B^n - algorytm określający, która operacja ze zbioru $\mathcal{K}^n(\nu)$ ma być wykonywana w n-tym takcie, $B^n(k^n(\nu)) = 1(0)$ oznacza, że w n-tym takcie ma być (nie ma być) wykonana operacja $k^n(\nu)$,

G_l^n - algorytm kolejności wykonywania operacji ze zbioru $\mathcal{K}_l^n$, $G_l^n(k_l^n(\nu)) = 1(0)$ oznacza, że operacja $k_l^n(\nu)$ w n-tym takcie została (nie została) wybrana z kolejki $\mathcal{K}_l^n$ do wykonania, $x_k \in \mathcal{X}_k$ - η_k - wymiarowy wektor stanu k-tej operacji zawierający położenia i prędkości realizatorów biorących udział w wykonywaniu operacji,

$u_k \in \mathcal{U}_k$ - μ_k - wymiarowy wektor wielkości sterujących,

$H_{w_l,k}$ - algorytm sterowania wykonywaniem k-tej operacji przez w_l-ty realizator, $H_{w_l,k} : \mathcal{X}_k \longrightarrow \mathcal{U}_k$.

Z punktu widzenia zadania sterowania konieczne jest formalne ujęcie dyskretnego procesu (obiektu sterowania), a więc podanie jego opisu (modelu matematycznego). Opis taki, oprócz modelu kompleksu operacji danego w postaci grafu Γ, powinien zawierać opis poszczególnych operacji k, $k \in \mathcal{K}$. Modelem operacji jest jej pełna charakterystyka obejmująca rodzaj realizatora, rodzaje i liczby innych zasobów oraz czas wykonania. Dla ustalonych rodzajów i liczby zasobów każda operacja jest scharakteryzowana liczbowo wprost przez czas jej wykonania $t_{w_l,k}$. W niektórych sytuacjach, podobnie jak w innych przypadkach kompleksów operacji, również dla operacji produkcyjnych może wystąpić potrzeba stosowania dynamicznego modelu operacji

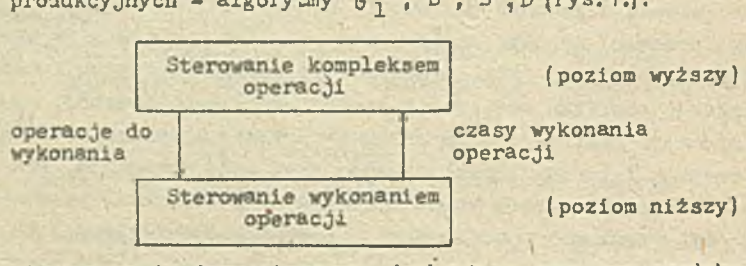
$$\dot{x}_k = f_k(x_k, u_k, \beta_k), \quad k \in \mathcal{K}, \tag{1}$$

gdzie: β_k - zestaw parametrów dodatkowo charakteryzujących operację. Czas trwania operacji $t_{w_l,k}$ jest tu wynikiem odpowiedniego sterowania $u_k(t)$ uzyskanego w wyniku minimalizacji kryterium jakości wykonania operacji $\hat{Q}_k(x_k, u_k, \beta_k)$. W przypadku gdy realizatorem jest robot przemysło-

wy, minimalizacja powyższego kryterium może zapewniać na przykład dokładność osiągnięcia stanu końcowego.
Jako cel sterowania procesem produkcji przyjmuje się minimalizację czasu wykonania serii N obiektów, tj. czasu, który upłynął od momentu rozpoczęcia procesu do momentu T zakończenia wykonywania ostatniej operacji ze zbioru $\mathcal{K}$.
System sterowania dyskretnym procesem produkcji powinien w każdym takcie sterowania spełniać następujące funkcje:

a/ przydzielanie kolejnej operacji do wykonania dla realizatora, który zakończył wykonywać poprzednią operację, tj. $k'^{n}(v)$ - funkcja realizowana przez algorytm G_1^n,
b/ uruchamianie produkcji nowych obiektów z serii - funkcja realizowana przez algorytm $\tilde{D}^n$,
c/ wybór następnej operacji, tj. $k^n(v)$ do wykonania dla obiektu, na którym zrealizowano poprzednią operację - funkcja realizowana przez algorytm B^n,
d/ przydział stanowiska dla operacji $k^n(v)$ - funkcja realizowana przez algorytm D^n,
e/ sterowanie wykonywaniem poszczególnych operacji - funkcja realizowana przez algorytm $H_{w_1,k}$.

Rozważany w pracy problem sterowania dyskretnymi procesami produkcji można sformułować w sposób następujący:
Dla danych $N, \mathcal{K}, \mathcal{L}, W_1, \Gamma, \Pi, f$ w każdym takcie sterowania wyznaczyć algorytmy G_1^n, $\tilde{D}^n$, B^n, D^n oraz algorytm $H_{w_1,k}$ minimalizujący kryterium $\hat{Q}_k(x_k, u_k, \beta_k)$ tak, aby czas wykonania serii obiektów był jak najkrótszy.
Sformułowane zadanie sterowania składa się z dwóch podstawowych części: sterowania wykonywaniem operacji - algorytm $H_{w_1,k}$ oraz sterowania kompleksem operacji produkcyjnych - algorytmy G_1^n, $\tilde{D}^n$, B^n, D^n (rys.1.).



Rys. 1. Schemat sterowania dwupoziomowego dyskretnym procesem produkcji.
Fig.1. Scheme of the two-level control of a discrete manufacturing process.

Naturalna jest funkcjonalna dekompozycja zadania sterowania na wymienione wyżej dwie części, co z punktu widzenia teorii sterowania prowadzi do zadania sterowania wieloetapowego, [np. 4]. Dalsza dekompozycja zadania sterowania polegająca na oddzielnym wyznaczaniu algorytmów G_1^n, $\tilde{D}^n$, B^n, D^n w

ramach części dotyczącej sterowania kompleksem operacji może być traktowana jako dekompozycja przestrzenna, ponieważ prowadzi do odrębnych zadań sterowania dla poszczególnych stanowisk. W rezultacie otrzymuje się zadanie sterowania wielopoziomowego [np. 2], które nie jest równoważne wyjściowemu zadaniu sterowania bez stosowania odpowiednich procedur koordynacji. W rozważanym problemie koordynacja dokonywana jest na podstawie grafu Γ zawierającego zależności czasowe pomiędzy poszczególnymi operacjami. Możliwy jest również trzeci rodzaj dekompozycji - dekompozycja czasowa. Polega ona na tym, że sformułowane zadanie sterowania nie jest rozwiązywane w całym przedziale czasowym, w którym trwa proces produkcji, ale poszczególne algorytmy są wyznaczane w krótszych okresach czasu, np. w poszczególnych taktach sterowania. Uzyskane zadanie sterowania na ogół nie jest równoważne zadaniu wyjściowemu.

Po przyjęciu dekompozycji czasowej wyjściowe zadanie sterowania sprowadza się do problemu, w którym jako kryterium przyjmuje się długość taktu sterowania Δ^n. Jest ona zależna od algorytmów $\tilde{D}^n$, B^n i D^n, które w n-tym takcie przydzielają operacje do wykonania na określonym stanowisku, oraz od wektora czasów obsługi zadań na poszczególnych stanowiskach. Można to formalnie ująć w postaci zależności

$$\Delta^n = F^n(D^n, \tilde{D}^n, B^n, \bar{\hat{t}}_{l,k}), \tag{2}$$

gdzie: $\bar{\hat{t}}_{l,k} = [\hat{t}_{l,1}, \hat{t}_{l,2}, \ldots, \hat{t}_{l,\mathcal{K}^n}]^T$, $l \in \mathcal{L}^n$, $\bigwedge_{k \in \mathcal{K}^n} \Pi(l,k) = 1$ - jest parametrem.

Zadanie tego poziomu polega więc na wyznaczaniu optymalnych algorytmów $D^n = D^{n*}$, $\tilde{D}^n = \tilde{D}^{n*}$, $B^n = B^{n*}$, które minimalizują wartość funkcji F^n.

W rezultacie otrzymane algorytmy D^{n*}, $\tilde{D}^{n*}$, B^{n*} będą zależne od wektora czasów obsługi operacji $\bar{\hat{t}}_{l,k}$. Czasy te zależą od algorytmów kolejności wykonywania operacji G_l^n oraz od wszystkich czasów wykonania operacji na stanowiskach, co można zapisać następująco

$$\hat{t}_{l,k} = \Phi_{l,k}^n(G_l^n, \bar{t}_{w_l,k}), \quad l \in \mathcal{L}^n, \ k \in \mathcal{K}^n, \tag{3}$$

gdzie: $\bar{t}_{w_l,k} = [t_{w_l,1}, t_{w_l,2}, \ldots, t_{w_l,\mathcal{K}_l^n}]$, $w_l \in \mathcal{W}_l$,

$$\bigwedge_{k \in \mathcal{K}_l^n} \Pi(l,k) = 1.$$

W powyższej zależności $\bar{t}_{w_l,k}$ jest parametrem. W wyniku minimalizacji funkcji $\Phi_{l,k}^n$ względem G_l^n otrzymuje się optymalny algorytm G_l^{n*}, który zależy od $t_{w_l,k}$. Czasy $t_{w_l,k}$ są pośrednimi rezultatami sterowania wykonywaniem poszczególnych operacji. Tak więc

$$t_{w_l,k} = \tilde{\Psi}_k^n(H_{w_l,k}(x_k), \beta_k). \tag{4}$$

Samo zadanie sterowania wykonywaniem operacji polega na określeniu takiego algorytmu $H_{w_1,k} = H^*_{w_1,k}$, dla którego kryterium $\hat{Q}_k(x_k, u_k, \beta_k)$ osiąga wartość minimalną. Tak więc czasy $t_{w_1,k}$ dla optymalnych algorytmów $H^*_{w_1,k}$ są zależne od parametrów β_k.
Stąd

$$t_{w_1,k} = \Psi_k(\beta_k). \tag{5}$$

W rezultacie długość taktu sterowania Δ^n jest zależna od β_k, ponieważ po złożeniu (2), (3), i (4)

$$\Delta^n = \hat{F}^n(\bar{\beta}_K), \tag{6}$$

gdzie: $\bar{\beta}_K = [\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_K]^T$.

Zależność (6) jest kryterium jakości sterowania dla rozpatrywanego zadania sterowania po zastosowaniu tylko dekompozycji czasowej. Jak łatwo zauważyć, zadania sterowania na obu poziomach są ze sobą powiązane i nie można ich traktować niezależnie.
Wyznaczanie algorytmów D^n, $\hat{D}^n$, B^n, G_1^n w sposób optymalny prowadzi zwykle do bardzo złożonych zadań optymalizacji dyskretnej. Dlatego taki sposób ich uzyskiwania ze względów czasowych nie może być preferowany do stosowania w systemach czasu rzeczywistego. Jest on jednak niezbędny do porównania innych, często heurystycznych, algorytmów poziomu wyższego, np. takich, jakie podano w [3].

3. Ilustracyjny przykład praktyczny

W celu zilustrowania przedstawionej w poprzednim rozdziale metody sterowania dyskretnymi procesami produkcji przedstawmy prosty przykład praktyczny. Dotyczy on zgrzewania obudowy pralki automatycznej. Proces taki jest prowadzony w ZSD "Polar" we Wrocławiu. Zgrzewanie obudowy pralki automatycznej odbywa się w linii, która składa się z pięciu stanowisk pracy ręcznej. Zbiór operacji do wykonania $\mathcal{K}$ jest pięcioelementowy:

k = 1 - zgrzewanie do wytłoczki obudowy dwóch uchwytów przewodów, wspornika wyłącznika i wspornika pompki wodnej (4 zgrzewy),

k = 2 - zaginanie wytłoczki obudowy,

k = 3 - zgrzewanie ściany tylnej do zagiętej wytłoczki obudowy (20 zgrzewów),

k = 4 - zgrzewanie do obudowy lewej i prawej poprzeczki dolnej (24 zgrzewy),

k = 5 - zgrzewanie do obudowy lewej i prawej poprzeczki górnej (24 zgrzewy).

Takie wyodrębnienie operacji jest celowe, ponieważ są potrzebne dla nich inne przyrządy pozycjonujące, a więc nie ma możliwości wykonywania w trak-

cie pewnej operacji zgrzewania zgrzewów zaliczonych do innej operacji. Kolejność wykonywania zgrzewów w ramach jednej operacji jest osobnym problemem, który nie będzie w pracy rozważany. W dalszym ciągu przyjmujemy, że jest ona stała. Tak więc z punktu widzenia całej operacji istotne jest umiejscowienie zgrzewu pierwszego i ostatniego. Jak już wspomniano powyżej, rzeczywisty proces produkcji zgrzewania obudowy pralki automatycznej jest wykonywany ręcznie, tzn. wszystkie operacje zgrzewania są wykonywane przez robotników wykorzystujących odpowiednie pistolety zgrzewalnicze. Także wszystkie czynności transportowe oraz pozycjonowanie nie są zautomatyzowane. Jedynie operacja gięcia jest wykonywana przez automat. Na potrzeby rozpatrywanego zadania sterowania przyjmijmy jednak, że część operacji jest wykonywana za pomocą robotów przemysłowych. Przyjmijmy mianowicie, że wszystkie operacje zgrzewania są wykonywane przez roboty przemysłowe wyposażone w pistolety zgrzewalnicze. Używając nomenklatury wprowadzonej w rozdziale 2. załóżmy, że są dwa rodzaje realizatorów wykonujących operacje zgrzewania, różniące się typem stosowanego robota i w konsekwencji są różne czasy wykonywania tych samych operacji zgrzewania. Niech zbiór $\mathcal{L}$ będzie 3-elementowy:

$l = 1$ - robot przemysłowy 1. typu z pistoletem zgrzewalniczym,

$l = 2$ - robot przemysłowy 2. typu z pistoletem zgrzewalniczym,

$l = 3$ - gięciarka.

Dalej, niech $W_1 = W_2 = W_3 = 1$, co oznacza, że na każdym stanowisku jest jeden realizator.

Odwzorowanie Π uwzględniające relacje pomiędzy zadaniami i realizatorami zdefiniujmy następująco:

$$\Pi(1,k) = \Pi(2,k) = \begin{cases} 1, \text{ dla } k = 1,3,4,5 \\ 0, \text{ dla } k = 2 \end{cases},$$

$$\Pi(3,k) = \begin{cases} 1, \text{ dla } k = 2 \\ 0, \text{ dla } k = 1,3,4,5 \end{cases}.$$

Graf Γ określający kolejność wykonywania operacji jest taki, jak na rys. 2.

Rys. 2. Graf Γ dla procesu zgrzewania obudowy pralki automatycznej

Fig. 2. Graph Γ for the spot welding process of the automatic washing machine casing.

Funkcje systemu sterowania:

1. Sterowanie wykonywaniem operacji (algorytm $H_{w_l,k}$).

   Dla operacji $k = 1,3,4,5$ jest to problem sterowania ruchem manipulatora robota przemysłowego z zadanego punktu początkowego do zadanego punktu końcowego. Zagadnienie to nie będzie tu szerzej przedstawiane. Szczegółowo zostało ono omówione w [3]. Przedstawione tam podejście bazuje na modelu dynamiki manipulatora. Zastosowano lokalnie optymalny algorytm

sterowania, zapewniający w każdym takcie sterowania maksymalne zbliżenie się do zadanego punktu końcowego. Procesor, który realizuje algorytm $H_{w_1,k}$ oblicza również czasy wykonania operacji $t_{w_1,k}$, które są potrzebne do określenia algorytmów poziomu wyższego. Dla operacji k = 2 nie ma problemu sterowania jej wykonaniem. Należy tylko określać czasy realizacji.

2. Przydział operacji do wykonania na stanowiskach (algorytm D^n).
   Operacje 1,3,4,5 można w każdym takcie sterowania przydzielać do dwóch różnych stanowisk. Dla operacji 2 nie ma wyboru, ponieważ $\Pi(1,2) = 1$ tylko dla $l = 3$.
3. Wybór operacji ze zbioru $\mathcal{K}^n(\nu)$ (algorytm B^n).
   Problem wyboru istnieje tylko dla $k'^n(\nu) = 3$, ponieważ w tym przypadku $\mathcal{K}^n(\nu) = \{4,5\}$.
4. Uruchamianie produkcji nowego obiektu (algorytm $\tilde{D}^n$).
   Ponieważ $\tilde{\mathcal{K}}(\nu) = \{1\}$ oraz $\tilde{\mathcal{L}} = \{1,2\}$, uruchamianie produkcji nowego obiektu może być dokonane na stanowisku $l = 1$ lub $l = 2$.
5. Obsługa kolejki obiektów przed stanowiskami (algorytm G_l^n).
   Problem wyboru obiektu do realizacji może istnieć dla wszystkich stanowisk.

Dla rozpatrywanego przykładu prześledźmy teraz działanie algorytmów D^n i B^n w zależności od poprzednio zakończonej operacji dla ν-tego produkowanego obiektu i dla n-tego taktu sterowania:

<u>$k'^n(\nu) = 1$.</u> Z grafu Γ wynika, że $\mathcal{K}^n(\nu) = \{2\}$, a więc algorytm B^n jest określony jednoznacznie, czyli $B^n(k^n(\nu) = 2) = 1$. Algorytm D^n jest również określony jednoznacznie, ponieważ $\Pi(1,2) = 1$ tylko dla $l = 3$.

<u>$k'^n(\nu) = 2$.</u> $\mathcal{K}^n(\nu) = \{3\}$, stąd algorytm B^n jest określony jednoznacznie, czyli $B^n(k^n(\nu) = 3) = 1$. $\Pi(1,3) = 1$ dla $l = 1$ lub $l = 2$, a więc jest możliwy wybór stanowiska dla wykonania operacji $k^n(\nu) = 3$, o czym decyduje algorytm D^n: $D^n(1,3) = 1$ albo $D^n(2,3) = 1$.

<u>$k'^n(\nu) = 3$.</u> Istnieje problem wyboru operacji k^n, ponieważ $\mathrm{card}(\mathcal{K}^n(\nu)) > 1$, a mianowicie $\mathcal{K}^n(\nu) = \{4,5\}$. Wtedy $B^n(k^n(\nu) = 4) = 1$ lub $B^n(k^n(\nu) = 5) = 1$. $\Pi(1,4) = 1$ dla $l = 1$ lub $l = 2$, a więc $D^n(1,4) = 1$ lub $D^n(2,4) = 1$.

<u>$k'^n(\nu) = 4$.</u> Zbiór $\mathcal{K}^n(\nu)$ może przyjąć dwie postaci:

1. $\mathcal{K}^n(\nu) = \emptyset$ i wtedy należy zakończyć produkcję ν-tego obiektu. Nie ma potrzeby określania algorytmów D^n i B^n.
2. $\mathcal{K}^n(\nu) = \{5\}$. Rozważania dla B^n i D^n są analogiczne jak w przypadku $k'^n(\nu) = 2$.

<u>$k'^n(\nu) = 5$.</u> Jest to przypadek symetryczny do $k'^n(\nu) = 4$ – rozważania analogiczne.

Dla rozważanego przykładu praktycznego przeprowadzono badania symulacyjne sprawdzające wpływ algorytmu G_l^n poziomu wyższego na czas wykonania całego procesu produkcji. Ogólnie wpływ taki jest oczywisty, co wynika z rozważań zawartych w punkcie 2. W tym konkretnym przypadku czas wykonania całości procesu zależy od drogi, jaką ma przebyć chwytak manipulatora robota prze-

mysłowego wyposażony w pistolet zgrzewalniczy od pozycji, w której się znalazł po zakończeniu operacji do pozycji, od której ma rozpocząć wykonywanie następnej operacji. Jak już wspomniano wyżej, punkty początkowy i końcowy dla każdej operacji oraz kolejność wykonywania zgrzewów w jej obrębie są zadane i nie podlegają zmianom. Postać algorytmu G_1^n ma wpływ na wybór następnej operacji do wykonania dla tego realizatora, który w danym takcie sterowania właśnie zakończył wykonywać operację, a więc pośrednio ma również wpływ na czas wykonania całego procesu. Rozważano dwie różne postaci algorytmu G_1^n (regulaminu obsługi kolejki):

1. Regulamin FIFO.
2. Regulamin, który wykorzystuje informację o tym, jaka operacja była poprzednio wykonywana na stanowisku. Formalnie regulamin ten można zapisać następująco:

$$G_1^n(k_1^n) = \begin{cases} 1, \text{ jeśli } \|y_{k_1^n,0} - y^*_{k',n}\| = \min\limits_{m \in \mathcal{K}_1^n} \|y_{m,0} - y^*_{k',n}\|, \; l=1,2 \\ 0, \text{ w pozostałych przypadkach} \end{cases} \qquad (7)$$

gdzie: $y_{\cdot,0}$ oraz $y^*_{\cdot}$ oznaczają odpowiednio położenia początkowe i końcowe dla operacji. Zależność (7) jest istotna jedynie dla stanowisk 1 i 2, ponieważ na stanowisku 3 można wykonywać tylko jedną operację, tzn. k = 2. Określano czasy wykonania procesu produkcji dla algorytmu G_1^n w postaci regulaminu FIFO - czas ten oznaczono przez T_1 oraz dla algorytmu G_1^n danego w postaci zależności (7) - czas oznaczono przez T_2. Badano wpływ długości serii produkcyjnej N oraz czasu wykonania operacji k = 2 na wskaźnik η dany w postaci $\eta \triangleq \frac{T_1 - T_2}{T_2}$. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch różnych czasów wykonania operacji 2: $t_{3,2}$ = 30 [s] lub $t_{3,2}$ = 60,5 [s] oraz dla N = 50, 200, 250, 500, 800, 1000. Założono, że operacje zgrzewania są wykonywane przez roboty o cylindrycznej przestrzeni roboczej - szczegóły podano w [3]. Wyniki, czyli wartości współczynnika η w procentach, przedstawiono w tabeli.

Tabela 1.

Wartości współczynnika η

N \ $t_{3,2}$	30 [s]	60,5 [s]
50	8,2	0,5
200	3,0	0,6
250	1,2	0,1
500	2,0	0,1
800	1,7	0,2
1000	1,2	0,2

Jak widać, różnica czasów wykonania procesu produkcji dla obu rozpatrywanych postaci algorytmów G_1^n jest niewielka, niemniej jednak drugi regulamin obsługi kolejki, zgodnie z oczekiwaniami, okazał się lepszy od pierwszego. Mniejsza wartość współczynnika η dla dłuższego z czasów $t_{3,2}$ jest spowodowana tym, że dla tego przypadku kolejka obiektów przed stanowiskami jest krótsza, a więc wpływ postaci algorytmów G_1^n na czas wykonania procesu jest również mniejszy. Długość serii produkcyjnej, dla większych wartości N, nie ma wpływu na wartość współczynnika η.

4. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono problem sterowania nadrzędnego dyskretnymi procesami produkcji oraz metodę jego rozwiązania. Rozważania zilustrowano na przykładzie procesu zgrzewania obudowy pralki automatycznej. Prezentowany sposób wyznaczania optymalnych algorytmów sterowania jest, z punktu widzenia metod optymalizacji, zadaniem optymalizacji dyskretnej, czyli problemem bardzo trudnym do rozwiązania w systemach czasu rzeczywistego. Dlatego w dalszym etapie prac podany sposób wyznaczania algorytmów sterowania dyskretnymi procesami produkcji będzie jedynie podstawą do porównania i wyboru algorytmów nieoptymalnych, ale zapewniających wyznaczenie sterowań w czasie rzeczywistym. Warto na koniec podkreślić, że proponowany ogólny sposób sterowania, spełniający szereg cząstkowych zadań sterowania, w szczególnych przypadkach może służyć do sterowania procesami produkcji, w których nie wszystkie jego funkcje są realizowane. Na przykład w procesach o nieelastycznej strukturze urządzeniowej nie występuje problem przydziału operacji do wykonania na stanowiskach (algorytm D^n), ponieważ każda operacja może być wykonywana tylko na jednym stanowisku. Natomiast może wystąpić problem obsługi kolejki obiektów czekających przed stanowiskami.

LITERATURA

[1] Bubnicki Z.: Two-level Optimization and Control of the Complex of Operations, Papers of IFAC/IFORS/IIASA Workshop on Systems Analysis Applications to Complex Programs, Pergamon Press 1977.

[2] Findeisen W.: Wielopoziomowe układy sterowania, PWN, Warszawa 1974.

[3] Józefczyk J., Wąsiewicz E.: Metodyka projektowania sterowania nadrzędnego dla grupy współpracujących robotów oraz współpracujących z nimi urządzeń technologicznych i pomocniczych. Raport ISTS serii SPR nr 7/87, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1987.

[4] Seidler J., Badach A., Molisz W.: Metody rozwiązywania zadań optymalizacji, WNT, Warszawa 1980.

Recenzent: Doc.dr hab.inż.M.Zaborowski
Wpłynęło do Redakcji do 1988-04-30.

НЕКОТОРАЯ ПРОБЛЕМА ИЕРАРХИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СВАРКИ КОРПУСА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТИРАЛЬНОЙ МАШИНЫ

Р е з ю м е

В работе представлена некоторая проблема иерархического управления дискретными промышленными процессами. Предложен метод решения этой проблемы. Подробно обсуждён практический пример сварки корпуса автоматической стиральной машины. Приведены результаты симуляционных исследований для избранной проблемы иерархического управления.

A DISCRETE MANUFACTURING HIERARCHICAL CONTROL PROBLEM TAKING THE SPOT WELDING PROCESS OF THE AUTOMATIC WASHING MACHINE CASING AS AN EXAMPLE

S u m m a r y

In the paper some problems of the discrete manufacturing systems hierarchical control is proposed. The method of solving this problem is presented. In particular the practical example of the spot welding process of the automatic washing machine casing is investigated. The results of simulation experiments for the selected hierarchical control problem are given.