ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: AUTOMATYKA z. 129 Nr kol. 1474

Jerzy JÓZEFCZYK, Donat ORSKI
Politechnika Wrocławska

ALGORYTM STEROWANIA DWUPOZIOMOWYM KOMPLEKSEM OPERACJI PRODUKCYJNYCH *

Streszczenie. Przedstawiono algorytm sterowania dla kompleksu operacji produkcyjnych, w którym łącznie są rozpatrywane: wybrane zagadnienie szeregowania zadań oraz zagadnienie bezkolizyjnego sterowania jazdą grupy realizatorów w celu minimalizacji długości uszeregowania. Prezentowany algorytm ma charakter adaptacyjny, a mianowicie rozwiązania w postaci tras przejazdów dla realizatorów są modyfikowane w trakcie działania algorytmu. Przedstawiono wyniki badania wrażliwości uzyskiwanego rozwiązania na zmiany liczby zadań i liczby realizatorów.

ALGORITHM FOR CONTROL OF TWO-LEVEL COMPLEX MANUFACTURING OPERATION SYSTEM

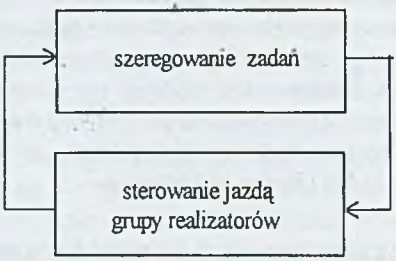
Summary. The problem of control in a complex manufacturing operation system is investigated. Two interconnected sub-problems, i.e. scheduling of manufacturing tasks and control of movement of a group of executors performing the tasks are solved to minimise the makespan. The adaptive solution algorithm is given, which allows current modifications of routes for executors. The results of sensitivity analysis of the algorithm are presented.

1. Wstęp

Rozwój problematyki sterowania operacyjnego (sterowania kompleksami operacji), zwłaszcza w zastosowaniu do sterowania dyskretnymi procesami produkcyjnymi, przebiega w dwóch kierunkach. Są formułowane i rozwiązywane coraz bardziej złożone problemy, bliższe zastosowaniom praktycznym oraz, ze względu na dużą złożoność obliczeniową takich problemów, są poszukiwane i stosowane nowe metody ich rozwiązywania [1,9-12]. W prezentowanej pracy są brane pod uwagę oba aspekty rozwoju problematyki sterowania operacyjnego. Przede wszystkim jest rozważany złożony problem sterowania. Polega on na łącznym rozpatrywaniu wybranego podproblemu z zakresu sterowania operacyjnego oraz określonego podproblemu sterowania wykonaniem operacji. Składnikiem wiążącym oba podproblemy jest ruch **realizatorów**. Zwykle pośrednim rezultatem sterowania ich jazdą są czasy przejazdów między różnymi stanowiskami, na których realizatory wykonują czynności produkcyjne (**czynności**). Przejazdy wraz z wykonywaniem czynności tworzą **zadania**. Przyjmujemy dalej, że czasy wykonywania czynności są dane a priori. Z kolei czasy przejazdów są

*) Praca została wykonana w ramach realizacji projektu badawczego nr 8 T11A 022 14, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

wynikami sterowania jazdą grupy realizatorów, ale również są podstawą do podejmowania decyzji o trasach przejazdów realizatorów. Decyzje takie są wynikiem rozwiązania podproblemu szeregowania zadań. Oba podproblemy w naturalny sposób tworzą system dwupoziomowy (rys.1.) z wyodrębnieniem na poziomie górnym tego podproblemu, który pozwala wyznaczyć decyzje o bardziej strategicznym znaczeniu. Koncepcja dwupoziomowego systemu sterowania kompleksem operacji produkcyjnych została po raz pierwszy wprowadzona w [2].



Rys.1. Dwupoziomowy system sterowania z szeregowaniem zadań i sterowaniem jazdą grupy realizatorów
Fig. 1. Two-level control system with scheduling of tasks and control of a group of executors

Głównym celem pracy jest prezentacja w rozdziale 3 adaptacyjnego algorytmu sterowania dwupoziomowym kompleksem operacji, z kryterium dla całego systemu w postaci wskaźnika jakości z poziomu górnego. Jest ona poprzedzona sformułowaniem problemu. W drugiej części podano wyniki badań symulacyjnych, w których między innymi określono wrażliwość rozwiązania na zmiany danych problemu, zwłaszcza liczby zadań i liczby realizatorów.

2. Sformułowanie problemu

Prezentacja sformułowania problemu dla systemu dwupoziomowego będzie poprzedzona podaniem krótkich sformułowań dla obu podproblemów składowych.

Na poziomie górnym są wyznaczane trasy przejazdów realizatorów z wykorzystaniem danych z poziomu dolnego w postaci czasów przejazdów realizatorów. Zadania są wykonywane w różnych miejscach, zwanych stanowiskami. Na każdym stanowisku a właściwie na zlokalizowanym tam obiekcie jest wykonywana jedna czynność. Zbiory zadań i stanowisk są jednakowo oznaczane jako $H = \{1,2,...,H\}$, gdzie H jest liczbą zadań lub stanowisk. Dodatkowo w skład systemu produkcyjnego wchodzi baza dla realizatorów, czyli takie stanowisko – oznaczane jako $h = H + 1$ – w którym każdy realizator rozpoczyna i kończy pracę. Wtedy $\overline{H} = H \cup \{H + 1$ jest zbiorem stanowisk wraz z bazą. Podobnie R i R oznaczają odpowiednio zbiór i liczbę realizatorów. Czas wykonania zadania h jest wektorem R-wymiarowym o elementach $\tau_{r,h}$, $r = 1,2,...,R$, będących czasami wykonania zadania h przez realizator r. Wtedy

$\tau_{r,h} = \bar{\tau}_{r,h} + \hat{\tau}_{r,g,h}$, gdzie $\bar{\tau}_{r,h}$ i $\hat{\tau}_{r,g,h}$ są odpowiednio czasem wykonania czynności na stanowisku i czasem dojazdu ze stanowiska g, $g = 1,2,...,H+1$. Rozważany podproblem szeregowania jest formułowany jako problem optymalizacyjny. Zmienną optymalizacyjną jest trójwymiarowa binarna macierz $\gamma = [\gamma_{r,g,h}]_{\substack{r=1,2,...,R \\ g,h=1,2,...,H+1}}$, gdzie $\gamma_{r,g,h} = 1(0)$, jeżeli realizator r wykonuje zadanie h po dojeździe ze stanowiska g (w przeciwnym przypadku). Jako wskaźnik jakości szeregowania przyjęto długość uszeregowania. Na macierz decyzyjną nałożono ograniczenia zapewniające, że każde zadanie będzie wykonane, trasy realizatorów są ciągłe, każdy realizator jeden raz wyjeżdża z bazy oraz trasy dla realizatorów są cyklami Hamiltona. Faktycznymi wynikami szeregowania są trasy przejazdów realizatorów, które można określić na podstawie tych elementów macierzy γ, które są równe jeden. Tylko takie elementy dla ustalonego r są brane pod uwagę przy wyznaczaniu trasy dla realizatora r, $r = 1,2,...,R$. Trasy są wyrażone w postaci ciągów stanowisk o początkach i końcach w bazie. Są oznaczane jako $M_r = (m_r(j))_{j=1,2,...,M_r}$, gdzie $m_r(j)$ i M_r to odpowiednio j-ty element trasy i jej długość. Wartość bieżącego elementu trasy M_r, tj. $m_r(j) = h$, $j = 1,2,...,M_r$ jest równa numerowi stanowiska (zadania), dla którego $\gamma_{r,m_r(j-1),m_r(j)} = 1$, gdzie $m_r(0) = H+1$. Jeżeli realizator dojeżdża do stanowiska $m_r(j)$, to musi je również opuścić. Wtedy $\gamma_{r,m_r(j-1),m_r(j)} = 1 \Rightarrow (\exists!\ m_r(j+1) \in \bar{H})(\gamma_{r,m_r(j),m_r(j+1)} = 1)$. Tak więc na podstawie macierzy γ trasy M_r mogą być wyznaczone w sposób iteracyjny. Sformułowanie podproblemu szeregowania zadań z uwzględnieniem ruchu realizatorów z poziomu górnego jest następujące. Dane: zbiór zadań H umieszczonych na stanowiskach oznaczanych również jako H, które wraz z bazą worzą zbiór $\bar{H}$, zbiór realizatorów R, macierze czasów dojazdów $\hat{\tau} = [\hat{\tau}_{r,g,h}]_{\substack{r=1,2,...,R \\ g,h=1,2,...,H+1}}$ i czasów wykonywania czynności na stanowiskach $\bar{\tau} = [\bar{\tau}_{r,h}]_{\substack{r=1,2,...,R \\ h=1,2,...,H+1}}$. Należy wyznaczyć macierz γ, a w konsekwencji trasy przejazdów realizatorów M_r, $r = 1,2,...,R$ tak, aby minimalizować długość uszeregowania.

Czasy dojazdu $\hat{\tau}_{r,g,h}$ są pośrednimi wynikami decyzji podejmowanych na poziomie dolnym, czyli bezkolizyjnego sterowania jazdą grupy realizatorów. Stosując znane metody modelowania mechanizmów jazdy i definiując stan jako $\dot{x}_r(t) = [y_r(t)^T, \dot{y}_r(t)^T]^T$, $r = 1,2,...,R$, gdzie $y_r(t)$ i $\dot{y}_r(t)$ są odpowiednio wektorami położeń i prędkości, jak również zakładając, że zmienne sterujące tworzą wektor $u_r(t)$, po dyskretyzacji można uzyskać model w postaci układu równań $x^{(i)}_{r,\nu+1} = f^{(i)}_r(x_{r,\nu}, u_{r,\nu})$, $i = 1,2,...,n$, $\nu = 0,1,2,...$ ze stanem początkowym $x^{(i)}_{r,0} \triangleq x^{(i)}_r(t_{m_r(j)})$, $j = 1,2,...,M_r$, gdzie ν oznacza dyskretny moment czasu. W momencie czasu $t_{m_r(j)}$ rozpoczyna się wykonywanie $m_r(j)$-tego elementu trasy M_r lub równoważnie rozpoczyna się wykonywanie zadania $h = m_r(j)$. Oznaczając przez $\bar{t}_{m_r(j)}$ moment czasu, w którym zadanie $h = m_r(j)$ się kończy, można podać następujący związek

między stanami początkowym i końcowym dla dwóch kolejnych elementów trasy M_r $x_r^{(i)}(\bar{t}_{m_r(j-1)}) = x_r^{(i)}(t_{m_r(j)})$, $j = 1,2,...,M_r$. Ponadto jest prawdziwa równość $t_{m_r(j)} = \bar{t}_{m_r(j-1)} + \bar{\tau}_{r,m_r(j-1)}$, co oznacza, że po osiągnięciu bieżącego stanowiska $h = m_r(j)$ realizator może rozpocząć pokonywanie następnego odcinka trasy dopiero po upływie czasu $\bar{\tau}_{r,h}$. Postaci ograniczeń nakładanych na zmienne sterujące i na zmienne stanu są bardzo ważne z punktu widzenia rozpatrywanego zagadnienia sterowania. Jest przyjmowane założenie, że na zmienne sterujące i te elementy wektora stanu, które są prędkościami, nałożone są ograniczenia przedziałowe. Dla tej części wektora stanu, która odpowiada położeniom, przyjęto inną postać ograniczeń – łącznie dla wszystkich takich zmiennych– a mianowicie: $y_{r,\nu} \in Y_{r,\nu}$, tzn. dla każdego ν położenie realizatora r powinno się zawierać w dopuszczalnym obszarze, którego kształt jest określany na podstawie położeń przeszkód stałych i aktualnych położeń przeszkód ruchomych, czyli innych realizatorów. Podproblem sterowania jazdą grupy realizatorów, który jest zlokalizowany na poziomie dolnym rozpatrywanego systemu dwupoziomowego, faktycznie obejmuje dwa powiązane ze sobą zagadnienia, a mianowicie sterowanie jazdą pojedynczych realizatorów dla ustalonych końców trajektorii oraz koordynację jazdy realizatorów w celu uniknięcia ewentualnych kolizji. W celu oceny procesu sterowania jazdą pojedynczego realizatora wzdłuż $m_r(j)$–tego odcinka trajektorii zaproponowano lokalny wskaźnik jakości sterowania, który zapewnia w każdym takcie sterowania maksymalnie możliwe zbliżenie się realizatora do zadanego stanu końcowego [7,8].

Jako kryterium dla dwupoziomowego kompleksu operacji przyjęto długość uszeregowania, co oznacza, że jest rozwiązywany problem czasowo optymalny w sensie długości uszeregowania. Dla poziomu dolnego nałożono warunek osiągania przez realizatory stanów końcowych z zadaną dokładnością, a nie sterowania czasowo optymalnego. Czasy dojazdów $\hat{\tau}_{r,g,h}$ są jedynie pośrednimi wynikami sterowania. Tak więc macierz czasów $\hat{\tau}$ zależy od $u \triangleq \{(u_{r,\nu})_{\nu=0,1,2,...} : r = 1,2,...,R$. Wtedy $\hat{\tau} = G(u)$ i $Q(\gamma,\hat{\tau}) = Q(\gamma, G(u)) = Q(M,u) \triangleq Q_{M,u}$, gdzie $M = \{M_r, r = 1,2,...,R$.

Ostatecznie, dla danych jak dla podproblemów z obu poziomów, problem sterowania dwupoziomowym kompleksem operacji polega na wyznaczaniu: tras przejazdów realizatorów M tak, aby minimalizować długość uszeregowania oraz zmiennych sterujących u minimalizujących kryterium z poziomu dolnego, co w konsekwencji prowadzi do osiągania stanów końcowych $x_r^{(i)}(\bar{t}_{m_r(j)})$, $m_r(j) = 1,2,...,M_r$, $r = 1,2,...,R$ z zadaną dokładnością.

3. Metoda rozwiązania

Oba podproblemy są ze sobą powiązane. Oznacza to, że decyzje podejmowane w trakcie rozwiązywania jednego z nich mogą być traktowane jako dane dla drugiego. Tak więc trasy przejazdów realizatorów, uzyskiwane na poziomie górnym, są danymi dla podproblemu

sterowania jazdą grupy realizatorów. Podobnie czasy przejazdów z poziomu dolnego wchodzą w skład danych dla podproblemu szeregowania z poziomu górnego. Zaproponowano kilka metod rozwiązania tak określonego złożonego problemu sterowania. Jedna z nich, polegająca na iteracyjnym rozwiązywaniu obu podproblemów, dla ustalonego rozwiązania początkowego oraz dla określonego warunku stopu została opisana w pracy [8]. Istota tej metody polega na dekompozycji, zakładającej możliwość zastosowania arbitralnie wybranego punktu startowego w postaci ustalonego rozwiązania dla jednego z podproblemów. W kolejnych iteracjach należy rozwiązywać oba podproblemy w całości, tzn. dla wyznaczonych tras przejazdów realizatorów należy przeprowadzać sterowanie ich jazdą wzdłuż całych tras, aż do uzyskania wszystkich czasów przejazdów.

Metoda opisywana w pracy ma zupełnie inny charakter. Umożliwia ona modyfikację algorytmu wyznaczania tras (algorytmu szeregowania) w trakcie sterowania jazdą na podstawie aktualnych informacji o uzyskiwanych czasach przejazdów. Czasy te mogą być różne w zależności od liczby sytuacji kolizyjnych, w których znalazły się realizatory. Znalezienie się w sytuacji kolizyjnej każdorazowo wydłuża czas przejazdu.

W celu wyjaśnienia algorytmu adaptacyjnego niezbędne jest wprowadzenie pojęcia **zdarzenia**. Polega ono na zakończeniu wykonania co najmniej jednego zadania. Zadanie się kończy, gdy zostanie wykonana czynność na stanowisku, czyli gdy upłynie czas $\bar{\tau}_{r,h}$ od chwili dojazdu realizatora do stanowiska h. W momencie czasu, w którym zachodzi zdarzenie, należy podjąć decyzję, czy wyznaczone poprzednio trasy nie będą zmieniane, czy też należy je zmodyfikować. Tak więc decyzje są podejmowane w dyskretnych momentach czasu. Inaczej można powiedzieć, że decyzje są podejmowane w taktach, a długości takich taktów, czyli przedziałów czasu, są zmienne. W dalszym ciągu n będzie oznaczać kolejne zdarzenie lub kolejny takt, w którym należy podjąć decyzję. Niech $M_r(n)$, $r = 1,2,...,R$ oznacza trasę realizatora r wyznaczoną w takcie n. W kolejnych taktach problem decyzyjny nie będzie polegał dokładnie na rozwiązywaniu sformułowanego wcześniej podproblemu szeregowania. Przy tworzeniu tras będą brane pod uwagę tylko te zadania, których wykonanie do momentu n nie zostało zakończone. Zbiór takich zadań oznaczamy przez $H(n)$. Jest jasne, że $H(0) = H$. W zbiorze $H(n)$ wyróżniamy trzy podzbiory: podzbiór zadań $H'(n)$, które w momencie n są właśnie wykonywane – zgodnie z algorytmem szeregowania wyznaczonym w poprzednim takcie, podzbiór zadań $H'''(n)$, które w takcie n się zakończyły oraz podzbiór zadań $H''(n)$, których wykonywanie jeszcze się nie rozpoczęło. Z poziomu dolnego w każdym takcie są przekazywane informacje o zbiorach $H'(n)$ i $H'''(n)$ oraz czas trwania taktu $\Delta(n)$. Z punktu widzenia szeregowania ważny jest podzbiór $H''(n)$, który możemy wyznaczać w sposób rekurencyjny jako $H''(n) = H''(n-1) - (H'(n) - H'''(n))$. Dla zadań z podzbiorów $H'(n)$ i $H'''(n)$ należy obliczać nowe czasy wykonywania zadań $\tau_{r,h}(n)$ według zależności $\tau_{r,h}(n) = \tau_{r,h}(n-1) - \Delta(n)$. Czasy wykonywania zadań ze zbioru $H''(n)$ nie ulegają zmianie i wynoszą $\tau_{r,h}(n) = \tau_{r,h}(n-1)$ oraz razem z czasami dla zadań ze zbiorów $H'(n)$ i $H'''(n)$

tworzą macierz czasów $\tau(n)=\bar{\tau}+\hat{\tau}(n)$. W bieżącym takcie n modyfikacjom ulegają również ograniczenia dla podproblemu szeregowania z ruchomymi realizatorami. Zadań ze zbioru $H'(n)$ nie można uwzględniać w podproblemie szeregowania, ponieważ nie można dla nich zmienić wykonującego je realizatora. Początkiem nowo tworzonych tras są stanowiska, na których realizatory zakończyły wykonywanie ostatniego zadania lub do których zdążają. Oznaczmy te stanowiska przez $h'(n)$. Wtedy podproblem szeregowania zdań z uwzględnieniem ruchu realizatorów w bieżącym takcie n można sformułować następująco. Dane są: $H''(n)$, R, $\bar{\tau}$, $\hat{\tau}(n)$. Należy wyznaczyć macierz $\gamma(n)$, na którą nałożono ograniczenia:

$$\gamma_{r,g,h}(n)\in\{0,1\} \text{ and } \gamma_{r,h,h}(n)=0,\ r=1,2,\dots,R,\ g,h=1,2,\dots,H''(n)+1, \tag{1}$$

$$\sum_{r=1}^{R}\sum_{g=1}^{H''(n)+1}\gamma_{r,g,h}(n)=1,\ h=1,2,\dots,H''(n), \tag{2}$$

$$\sum_{g=1}^{H''(n)+1}\gamma_{r,g,p}(n)=\sum_{h=1}^{H''(n)+1}\gamma_{r,p,h}(n),\ r=1,2,\dots,R,\ p=1,2,\dots,H''(n)+1 \tag{3}$$

$$\sum_{h=1}^{H''(n)+1}\gamma_{r,h'(n),h}(n)=1,\ r=1,2,\dots,R,\ h'(n)=1,2,\dots,H'(n), \tag{4}$$

$$\sum_{h=1}^{H''(n)}\gamma_{r,h,H+1}(n)=1,\ r=1,2,\dots,R, \tag{5}$$

$$\gamma\in S, \tag{6}$$

gdzie

$$S=\left\{\gamma(n):\ \sum_{g\in H_S}\sum_{h\in H_S}\gamma_{r,g,h}(n)\le H_S-1,\right\}\ H_S \text{ – niepusty podzbiór } H''(n),\ r=1,2,\dots,R \tag{7}$$

tak, aby minimalizować kryterium

$$Q(\gamma(n))=\max_{r=1,2,\dots,R}\left[\sum_{h=1}^{H''(n)+1}\sum_{h=1}^{H''(n)+1}\gamma_{r,g,h}(n)\cdot\left(\bar{\tau}_{r,h}+\hat{\tau}_{r,g,h}(n)\right)\right] \tag{8}$$

Sformułowany podproblem polega faktycznie na szukaniu dróg Hamiltona dla poszczególnych realizatorów. Są one trasami przejazdów $M_r(n)$ o początku na stanowiskach $h'(n)$ oraz końcu w bazie $h=H+1$. Inaczej mówiąc $M_r(n)=(m_r(1,n),m_r(2,n),\dots,m_r(M_r(n),n))$, gdzie $m_r(1,n)=h'(n)$ dla $h'(n)\in M_r(n-1)$ oraz $m_r(M_r(n),n)=H+1$. Na podstawie wyznaczonych marszrut można określić przewidywane momenty zajścia zdarzeń polegających na zakończeniu wykonywania zadań lub zjazdach realizatorów do bazy. Liczba takich momentów $Z(n)$ jest nie większa niż $H+R$. Można je obliczyć w sposób rekurencyjny, to zna-

czy $t^h(n) = \bar{t}^{m_r(j,n)} = \underline{t}^{m_r(j-1,n)} + \tau_{r,h} = \underline{t}^{m_r(j-1,n)} + \hat{\tau}_{r,h} + \hat{\tau}_{r,m_r(j-1,n),m_r(j,n)}$, $j = 1, \ldots, M_r(n)$, $r = 1,2,\ldots,R$, gdzie $m_r(j,n)$ jest tym elementem trasy $M_r(n)$, który polega na wykonaniu przez realizator r zadania h. Ponadto $m_r(0,n) = 0$. Po uporządkowaniu momenty czasu $t^h(n)$ tworzą ciąg $T(n)$. W każdym takcie jest sprawdzany warunek $T(n) = T(n-1)$, $n = 1,2,\ldots$ tzn. $t^z(n) = t^z(n-1)$, $z = 1,2,\ldots,Z$. Jeśli jest on spełniony, to w takcie n jest realizowana trasa wyznaczona w poprzednim takcie. W przeciwnym przypadku jest rozwiązywany podproblem szeregowania. Aby rozpocząć działanie algorytmu, jest wyznaczana macierz czasów dojazdów $\hat{\tau}(0)$ w ten sposób, że są obliczane czasy bezkolizyjnych przejazdów dla wszystkich możliwych stanowisk oraz realizatorów.

Wtedy adaptacyjny algorytm sterowania dwupoziomowym kompleksem operacji można przedstawić następująco. Dane są: $\overline{H}(0)$, R, $\hat{\tau}$, $\bar{\tau}$, $n = 0$.

1. Jeśli $n = 0$, to przejdź do kroku 2. Jeśli $n > 0$, to sprawdź, czy $Z(n) > 0$. Jeśli tak, to przejdź do następnego kroku. W przeciwnym przypadku zakończ działanie algorytmu.
2. Rozwiąż podproblem sterowania jazdą grupy realizatorów w celu wyznaczenia $u(n)$.
3. Zaobserwuj momenty zajścia zdarzeń $t^z(n)$ i oblicz czasy dojazdów $\hat{\tau}(n)$ oraz czasy wykonania zadań $\tau(n)$.
4. Sprawdź, czy $(\forall h'(n) \in H^m(n))\ \left(t^z(n) = t^{h'(n)}(n-1)\right)$. Jeśli tak, to podstaw $n = n+1$ i przejdź do kroku 1. W przeciwnym przypadku przejdź do kroku następnego.
5. Rozwiąż podproblem szeregowania w celu uzyskania macierzy $\gamma(n)$ lub równoważnie ciągów tras przejazdów realizatorów $M(n)$. Wyznacz ciąg momentów zajścia zdarzeń $T(n)$ oraz ich liczbę $Z(n)$ i przejdź do kroku 1.

4. Badania symulacyjne

W celu symulacyjnego przetestowania przedstawionego algorytmu rozwiązania opracowano i wykorzystano odpowiedni program komputerowy, w którym ruch realizatorów był symulowany programowo. Podproblem szeregowania był rozwiązywany z wykorzystaniem algorytmu przybliżonego o wielomianowej złożoności obliczeniowej. Szczegóły można znaleźć w pracy [4]. Stąd uzyskany wynik dla rozpatrywanego systemu dwupoziomowego ma również charakter przybliżony. W celu podkreślenia tego faktu w dalszej części wartość uzyskiwanego kryterium jakości szeregowania będzie oznaczana jako $\tilde{Q}_{M,u}$. W badaniach symulacyjnych skoncentrowano się na przebadaniu wrażliwości kryterium jakości szeregowania na zmianę liczby zadań oraz liczby realizatorów. Wrażliwość wskaźnika jakości $\tilde{Q}_{M,u}$ zdefiniowano jako:

$$\tilde{Q}^{X}_{M,u} \triangleq \left| \frac{\tilde{Q}_{M,u}(X+1)-\tilde{Q}_{M,u}(X)}{(X+1)-X} \right| = \left| \tilde{Q}_{M,u}(X+1)-\tilde{Q}_{M,u}(X) \right|, \tag{9}$$

gdzie $X = H$ lub R, czyli X jest liczbą zadań lub liczbą realizatorów, a $\tilde{Q}_{M,u}(X)$ jest wartością kryterium odpowiednio dla H zadań lub R realizatorów. Wstępne badania przeprowadzono dla $H = 16$ i $R \le 8$. Przykładowe wyniki podano w tablicy 1 oraz na wykresach (rys.2 i rys.3). W tablicy 1 są przedstawione: wartości kryterium jakości $\tilde{Q}_{M,u}(R)$, trasy przejazdów realizatorów M_r, $r = 1,2,\ldots,R$ oraz czasy symulacji T_s [min:s].

Tablica 1

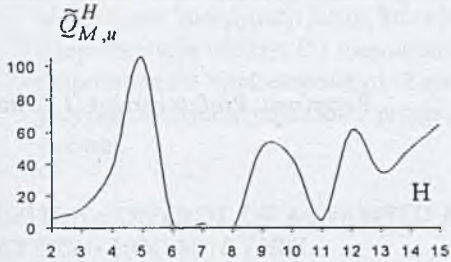
Wyniki symulacji dla różnej liczby realizatorów

R	$\tilde{Q}_{M,u}(R)$	$M_r, r = 1,2,\ldots,R$			T_s
2	529	M_1 = (17-1-5-9-7-11-15-13-3-17)		M_2 = (17-4-6-10-8-12-16-14-2-17)	7:31
3	544	M_1 = (17-4-16-15-11-7-1-17)		M_2 = (17-9-14-12-6-3-17)	10:47
		M_3 = (17-8-10-13-5-2-17)			
4	445	M_1 = (17-5-9-13-1-17)		M_2 = (17-11-16-8-4-17)	10:57
		M_3 = (17-7-14-12-2-17)		M_4 = (17-15-10-6-3-17)	
5	375	M_1 = (17-13-7-1-17)	M_2 = (17-9-14-16-4-17)	M_3 = (17-8-12-2-17)	13:53
		M_4 = (17-15-10-3-17)	M_5 = (17-6-5-11-17)		
6	303	M_1 = (17-9-13-1-17)	M_2 = (17-12-6-17)	M_3 = (17-8-14-2-17)	14:53
		M_4 = (17-10-4-17)	M_5 = (17-11-15-5-17)	M_6 = (17-16-7-3-17)	
7	331	M_1 = (17-9-15-1-17)	M_2 = (17-13-6-17)	M_3 = (17-14-7-17)	16:25
		M_4 = (17-10-4-17)	M_5 = (17-11-5-17)	M_6 = (17-12-16-3-17)	
		M_7 = (17-8-2-17)			
8	295	M_1 = (17-11-1-17)	M_2 = (17-16-7-17)	M_3 = (17-8-9-17)	19:52
		M_4 = (17-10-6-17)	M_5 = (17-4-5-17)	M_6 = (17-12-3-17)	
		M_7 = (17-13-2-17)	M_8 = (17-15-4-17)		

Analizując przedstawione wyniki można stwierdzić, że wrażliwość rozwiązania maleje ze wzrostem R, a dla różnych wartości H ma charakter nieregularny. Potwierdza to duży rozrzut wyników wokół wartości średnich, który wyrażony w postaci odchyleń standardowych wynosi 34,2 oraz 31,1 odpowiednio dla zmian R oraz H.

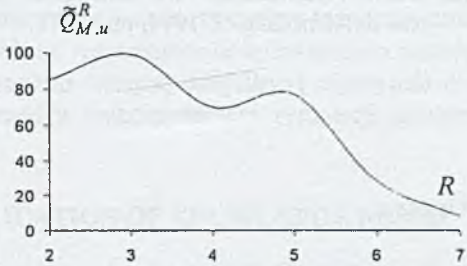
5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono adaptacyjny algorytm sterowania dwupoziomowym kompleksem operacji produkcyjnych. Składają się na niego: algorytm szeregowania oraz algorytm sterowania jazdą grupy realizatorów w obecności przeszkód ruchomych. W innych pracach (np.[8]) przedstawiono odmienne podejście do rozwiązania tego problemu, a mianowicie tzw. algorytm iteracyjny oraz algorytm wykorzystujący sterowanie dyspozytorskie. Zaproponowano tam również porównanie tych algorytmów, wykorzystując do tego badania symulacyjne. Porównanie oraz przede wszystkim ocena efektywności opracowanych algorytmów są sprawą otwartą, ale wydają się być problemem bardzo trudnym.



Rys.2. Zależność $\tilde{Q}^H_{M,u}$ od H

Fig.2. Dependence of $\tilde{Q}^H_{M,u}$ on H



Rys.3. Zależność $\tilde{Q}^R_{M,u}$ od R

Fig.3. Dependence of $\tilde{Q}^R_{M,u}$ on R

LITERATURA

1. Dumas, Y., Desrosiers, J., Gelinas, E., Solomon, M.M.: An optimal algorithm for the traveling salesman problem with time windows. Operations Research, vol. 43, No. 2, 1995, pp.367–371.
2. Józefczyk J.: Two-level control algorithm for mobile executors in flexible manufacturing systems. Proc. of 10th Int. Conf. on Systems Engineering, Coventry, 1994, pp.542–549.
3. Józefczyk J.: On the functional decomposition approach to the problem of tasks scheduling on moving executors. Proc. of 11th Int. Conf. on Systems Engineering, Las Vegas, 1996, pp.885–890.
4. Józefczyk J.: Szeregowanie zadań w kompleksie operacji z uwzględnieniem ruchu realizatorów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1996.
5. Józefczyk J.: Simulation of the complex operation system with moving executors, Proc. of 12th Int. Conf. on Systems Engineering, Coventry, 1997, pp.349–354.
6. Józefczyk J.: An algorithm for scheduling tasks on moving executors. Proc. of 1st IFAC Workshop on Manufacturing Systems: Modelling, Management and Control, Vienna, 1997, pp.139–144.

7. Józefczyk J.: Knowledge based motion control of a group of mobile executors in the two-level complex operation system. Materiały 2. World Manufacturing Congress, Durham, Anglia, 1999, pp.167-173.
8. Józefczyk J.: Decision making and simulation for two-level complex manufacturing system, Mat. 6. Międzyn. Symp. MMAR 2000, Miedzyzdroje, 2000 (w druku).
9. Langevin A., Desrochers M., Desrosiers J., Gelinas S., Soumis F.: A two–commodity flow formulation for the traveling salesman and the makespan problems with time windows. Networks, vol.23, 1993, pp.631–640.
10. Mingozzi A., Bianco L., Ricciardelli S.: Dynamic programming strategies for the traveling salesman problem with time window and precedence constaraints. Operations Research, vol. 45, No. 3, 1997, pp.365–377.
11. Nelson R.T., Sarin R.T., Daniels R.L.: Scheduling with multiple performance measures: the one machine case. Management Science 32,1986, pp.464–479.
12. Prosser P., Buchanan I.: Intelligent Scheduling: Past, present and future. Intelligent Systems Eng. 3, 1994, pp.67–78.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. J.Klamka

Abstract

The paper is concerned with decision problems in a complex operation system with application to discrete manufacturing systems. Two interconnected decision sub-problems, which form two-level system, are taken into account, i.e. scheduling of independent, nonpreemptive tasks on unrelated executors to minimise the makespan as well as a motion control of a group of executors performing the tasks. Both sub-problems were investigated separately and several scheduling and control algorithms have been derived and presented in former works. The problems are interconnected due to the fact that results from one of them are the input data for the other. The main purpose of the paper is to present an algorithm for solving both sub-problems in two-level system to minimise the makespan. As the solution the routes for executors and control signals for driving mechanisms of executors are obtained. The heuristic algorithm is proposed. It works in an adaptive way and allows modifying the routes of executors during the control procedure. Exemplary results of computer simulations are presented. The part of them consists in verification of the sensitivity of performance index (makespan) with respect to the data of the problem.