

Rafał GISKO  
Politechnika Łódzka

## PROBLEM HARMONOGRAMOWANIA ZADAŃ TRANSPORTOWYCH W SYSTEMIE PRZEPLYWOWYM BEZ POSTOJÓW NA PRZYKŁADZIE AUTOMATU GALWANIZERSKIEGO

**Streszczenie.** Problem szeregowania zadań w systemach przepływowych został już dawno zdefiniowany, a także opracowano szereg algorytmów, które umożliwiają wyznaczanie optymalnego rozwiązania względem postawionego kryterium. Jednakże w praktycznych rozważaniach często brakuje algorytmów, które uwzględniałyby wszystkie wymagane ograniczenia stawiane przez system produkcyjny. Przykładem takiego systemu przepływowego, w którym problem harmonogramowania zadań posiada znaczny stopień złożoności, jest automat galwanizerski. Podstawowym ograniczeniem stosowalności wszelakich algorytmów harmonogramujących zadania jest ściśle zachowanie wymagań technologicznych produkcji. W przypadku galwanizerni jest to zachowanie wszystkich czasów technologicznych poszczególnych obróbek, a także zachowanie zerowych czasów międzyoperacyjnych dla wszystkich obrabianych detali (z ang. *no-wait flow shop system*). Najważniejszym ograniczeniem w automacie galwanizerskim jest zagadnienie transportowe, które sprawia, iż bezwzględnie optymalne rozwiązanie z punktu widzenia wydajności systemu nie istnieje. Można jedynie przybliżyć rozwiązanie, które stanowi tzw. rozwiązanie suboptymalne.

## TRANSPORT TASKS SCHEDULING PROBLEM IN NOW-WAIT FLOW SHOP SYSTEM FOR GALVANIZING PLANT EXAMPLE

**Summary.** Task scheduling problem in no-wait flow shop system is already defined a long time ago. Furthermore several algorithms are developed which can be used to scheduling of such systems. Nevertheless for practical application many algorithms do not take into consideration all expected limitations. Fundamental applicability limitation of any scheduling algorithm is a conservation of technology time. In the case of galvanizing plant the main problem is a transport scheduling because transport problem causes difficulties with continuity keeping of production process and technological time limit. It's very important, because the started production process cannot be interrupted or stopped. In addition the transport problem causes that an optimal solution doesn't exist. It is only possible to approximate a suboptimal schedule.



## 1. Automat galwanizerski jako system przepływowy bez postojów

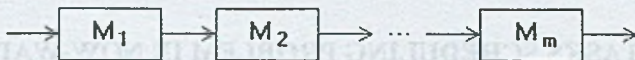
### 1.1. System przepływowy

Zagadnienie związane z ogólnym problemem przepływowym, zapisywane jako  $FP|\Gamma|\delta$ , można zdefiniować następująco [6]. Dany jest zbiór  $n$  zadań  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ , który jest przeznaczony do wykonania za pomocą zbioru maszyn  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ . Każde zadanie  $J_l \in J$  zawiera ciąg niepodzielnych operacji  $J_l = (O_{l1}, O_{l2}, \dots, O_{lm})$ . Realizacje tych operacji wykonywane są kolejno na maszynach  $M_1, M_2, \dots, M_m$ . Operacja  $O_{lk}$  ma być wykonana przez maszynę  $M_k$  w czasie  $p_{lk}$ .

Ponadto zakłada się, że:

- w każdej chwili czasowej każda maszyna może realizować co najwyżej jedną operację,
- w każdej chwili czasowej można wykonywać co najwyżej jedną operację należącą do danego zadania, zaś rozpoczęta operacja nie może zostać przerwana.

Dopuszcza się istnienie operacji pustych, tzn. takich, których czas wynosi 0. Zadanie optymalizacji polega na znalezieniu takiego uszeregowania realizacji zadań na każdej maszynie  $M_k$ , która minimalizuje kryterium optymalności  $\delta$ . W przypadku gdy kolejność obróbki na wszystkich maszynach jest jednakowa, zagadnienie sprowadza się do permutacyjnego problemu przepływowego i oznaczane jest symbolem  $FP|\Gamma|\delta$  (rys. 1). Problem ten pozwala zamodelować systemy produkcyjne, w których proces wytwórczy posiada jednakowe marszruty dla wszystkich wytwarzanych detali. Przykładem takiego systemu jest automat galwanizerski, w którym obróbka wszystkich detali zazwyczaj posiada jednakową marszrutę. W rozwiązaniach praktycznych najczęściej przyjmowanym kryterium optymalności jest maksymalny czas zakończenia  $C_{\max}$ , maksymalna nieterminowość  $L_{\max}$  oraz maksymalny koszt  $f_{\max}$ .



Rys. 1. Marszruta realizowanych zadań w permutacyjnym problemie przepływowym

Niech  $\pi$  będzie dowolną permutacją liczb ze zbioru  $\{1, 2, \dots, n\}$ , zaś  $\Pi$  stanowi zbiór wszystkich tych permutacji. Każda permutacja  $\pi$  określa kolejność realizacji zadań na wszystkich maszynach. Dla każdej realizowanej operacji należącej do zadania definiuje się czasy rozpoczęcia wykonania  $S_{l,\pi(k)}$ , gdzie  $l \in M$  oraz  $k \in J$ . Ponadto czasy te muszą spełniać następujące ograniczenia:

$$S_{l,\pi(l)} \geq 0 \quad (1.1)$$

$$S_{l,\pi(k-1)} + p_{l,\pi(k-1)} \leq S_{l,\pi(k)}, \quad k \in \{2, 3, \dots, r\}, \quad l \in M \quad (1.2)$$

$$S_{l-1,\pi(k)} + p_{l-1,\pi(k)} \leq S_{l,\pi(k)}, \quad k \in J, \quad l = \{2, 3, \dots, m\} \quad (1.3)$$



Z ograniczenia (1.1) wynika, iż chwila rozpoczęcia każdego zadania musi być nieujemna, (1.2) – chwila rozpoczęcia operacji na maszynie  $l$  nie może się zacząć wcześniej niż chwila zakończenia operacji z poprzedniego zadania, a (1.3) – każda następna operacja należąca do pojedynczego zadania musi się zacząć nie wcześniej niż chwila zakończenia operacji poprzedniej.

Zadanie optymalizacji polega na znalezieniu takiej permutacji  $\pi$ , dla której spełniona jest następująca zależność:

$$C_{\max}(\pi) = \min_{\pi \in \Pi} C_{\max}(\pi) \quad (1.4)$$

Powyższy problem jest problemem silnie NP-trudnym. Stosowanie metody podziału i ograniczeń do rozwiązywania takich zagadnień jest więc uzasadnione.

## 1.2. System przepływowy bez postojów

Omówiony powyżej problem przepływowy może zostać uzupełniony o ograniczenie w postaci zerowego czasu międzyoperacyjnego dla wszystkich operacji, tzw. warunek „no wait”. Dla dowolnej pary operacji  $O_{i,k}$  i  $O_{i,k+1}$ ,  $k = \{0, 1, \dots, n-1\}$  należących do zadania  $J_i \in J$  można wyznaczyć czas międzyoperacyjny, który liczony jest jako różnica pomiędzy chwilą zakończenia operacji  $O_{i,k}$  a chwilą rozpoczęcia następnej operacji  $O_{i,k+1}$ . Ograniczenie (1.3) przyjmie wtedy następującą postać:

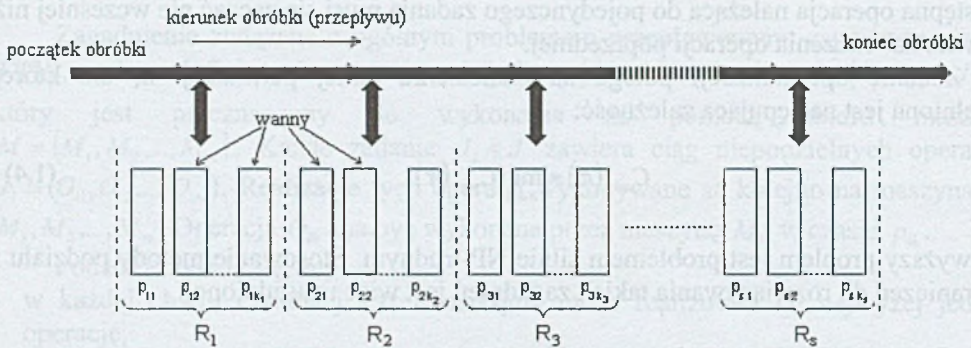
$$S_{l-1,\pi(k)} + p_{l-1,\pi(k)} = S_{l,\pi(k)}, \quad k \in J, \quad l = \{2, 3, \dots, m\} \quad (1.5)$$

System przepływowy to taki system, w którym istnieje wymaganie, aby po zakończeniu dowolnej obróbki każdego detalu detal był natychmiast poddawany następnej obróbce, o ile dana obróbka nie jest ostatnią w procesie technologicznym. W przykładowej realizacji automatu galwanizerskiego ograniczenie to wynika przede wszystkim z wymogu technologicznego, w którym proces obróbki chemicznej każdego detalu nie może być zatrzymany. W przeciwnym wypadku detale ulegałyby np. korozji, co jest niedopuszczalne. Ograniczenie to znacznie komplikuje zadanie optymalizacji, przez co wypracowywane sterowanie przez automat nie może się odbywać w czasie rzeczywistym, ale zanim jeszcze detal trafi do obróbki – z góry musi być zapewniona ciągłość produkcji wszystkich detali, których obróbka się rozpocznie.

## 1.3. Struktura automatu galwanizerskiego

Przykład automatu galwanizerskiego, zorganizowanego jako system przepływowy bez postojów, został przedstawiony na Rys. 2. Park maszynowy składa się z  $s$  różnych operacji, zaś  $i$ -ta operacja realizowana jest na jednym ze stanowisk należących do grupy  $R_i$ , w której ich liczba wynosi  $k_i$ . Każde stanowisko należące do grupy  $R_i$  realizuje identyczny typ obróbki, zaś sama operacja jest operacją

niepodzielną. Oznacza to, że  $i$ -ta operacja jest realizowana na jednym z alternatywnych stanowisk należących do grupy  $R_i$ .



Rys. 2. Struktura rozważanego systemu przepływowego

Całkowita liczba wszystkich stanowisk (procesorów) wynosi:

$$\sum_{i=1}^s k_i \quad (1.6)$$

Niech  $t_{ij}$  będzie pojedynczym czasem technologicznym  $i$ -tej operacji dla  $j$ -tego detalu. Każdy detal posiada zdefiniowanych  $s$  czasów operacji technologicznych. Zerowy czas dla danej operacji oznacza, że detal nie jest poddawany tej obróbce. Wszystkie czasy operacji technologicznych, dla wszystkich zdefiniowanych detali, można zapisać w postaci macierzy  $T$  czasów operacji technologicznych:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{s1} & t_{s2} & \dots & t_{sn} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

gdzie:  $n$  – liczba detali,  $s$  – liczba typów obróbek w linii technologicznej. Momenty początkowe  $r_{ij}$  oraz zakończeń  $z_{ij}$  operacji technologicznych stanowią elementy macierzy  $R$  oraz  $Z$ , które mają następującą postać:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{s1} & z_{s2} & \dots & z_{sn} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

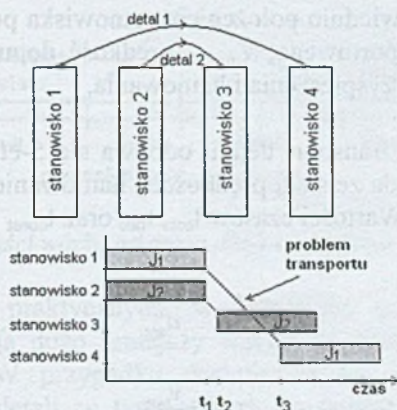


$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & r_{3n} \\ r_{s1} & r_{s2} & \dots & r_{sn} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Liczba wierszy macierzy T, Z i R odpowiada liczbie typów obróbek w linii produkcyjnej. W przypadku pomijania danej czynności wystąpi tzw. operacja opisana zerowym czasem technologicznym w macierzy T. Każda z kolumn macierzy T, Z i R związana jest z jednym detalem, który uczestniczy w szeregowaniu zadań.

## 2. Harmonogramowanie zadań transportowych w automacie

Transport pomiędzy stanowiskami obróbczymi stanowi integralną część całego systemu i jego realizacja odbywa się w czasie skończonym. Ponadto, zasoby transportowe są ograniczone w postaci wymaganego czasu na przemieszczenie z jednego stanowiska do drugiego, liczby możliwych jednocześnie realizowanych przemieszczeń, możliwych wzajemnych kolizji urządzeń transportowych itp. Konsekwencją jest to, że przygotowany wcześniej harmonogram realizacji zadań może być nierealizowalny, gdyż nie będzie możliwe zachowanie pożądaných chwil początkowych i końcowych każdej zaplanowanej obróbki. W przypadku automatu galwanizerskiego taka sytuacja jest niedopuszczalna, gdyż odstępstwo od czasów technologicznych poszczególnych obróbek może spowodować nieprawidłowe pokrycie powłoką galwaniczną.



Rys. 3. Przykład wystąpienia problemu transportu detali

Na rysunku 3 przedstawiono przykład problemu z realizacją transportu detali  $J_1$  i  $J_2$  odpowiednio ze stanowiska 1 na 4 oraz ze stanowiska 2 na stanowisko 3. Obydwa detale wymagają przeniesienia w chwili  $t_1$ . Ze względu na skończony czas ruchu wózka transportowego w chwili  $t_2$ , detal  $J_2$  powinien zostać umieszczony na stanowisku 3, zaś w chwili  $t_3$  detal  $J_1$  na stanowisku 4. W przypadku dostępności jednego wózka transportowego nie jest możliwe zrealizowanie zadania, gdyż pojedynczy wózek podczas swojego ruchu może przenosić tylko jeden detal.

W przedstawionym przykładzie wystąpiło żądanie przemieszczenia dwóch detali w tej samej chwili czasowej  $t_1$ . Ponadto, czasy przemieszczenia detali z jednego stanowiska do drugiego nie są zerowe; dla detalu  $J_1$  wynosi on  $t_2 - t_1$ , zaś dla detalu  $J_2$  czas ten równy jest  $t_3 - t_1$ .

Czas transportowy  $t_{tran}$  potrzebny na wykonanie dowolnego zadania transportowego w automacie wynika z poniższej zależności:

$$t_{tran} = t_{pull} + t_{acc} + t_{const} + t_{dec} + t_{push} \quad (2.0)$$

gdzie:  $t_{pull}$  - czas potrzebny na pobranie detalu ze stanowiska,  $t_{acc}$  - czas rozpędzania wózka,  $t_{const}$  - czas jazdy wózka ze stałą prędkością,  $t_{dec}$  - czas hamowania wózka,  $t_{push}$  - czas umieszczania detalu na stanowisku

Czasy  $t_{pull}$  oraz  $t_{push}$  są czasami niezbędnymi na wyjęcie oraz umieszczenie detalu w wannic z kąpielą chemiczną i są definiowane jednorazowo dla wszystkich typów obróbek (nie zależą od położenia stanowiska, na którym jest ona realizowana). Pozostałe czasy, tj. rozpędzania, hamowania i jazdy jednostajnej, zależą od położenia względem siebie dwóch stanowisk: początkowego i końcowego, pomiędzy którymi ma być przetransportowany detal, a także od parametrów dynamicznych wózka. Wszystkie wartości tych czasów są niezerowe, gdy spełniona jest zależność:

$$|x_m - x_n| > \frac{v_{max}^2}{2a_{acc}} + \frac{v_{max}^2}{2a_{dec}} \quad (2.1)$$

gdzie:  $x_m$  oraz  $x_n$  są odpowiednio położeniem stanowiska początkowego i końcowego dla danego zadania transportowego,  $v_{max}$  - prędkość dopuszczalna wózka,  $a_{acc}$  oraz  $a_{dec}$  - odpowiednio stała przyspieszenia i hamowania.

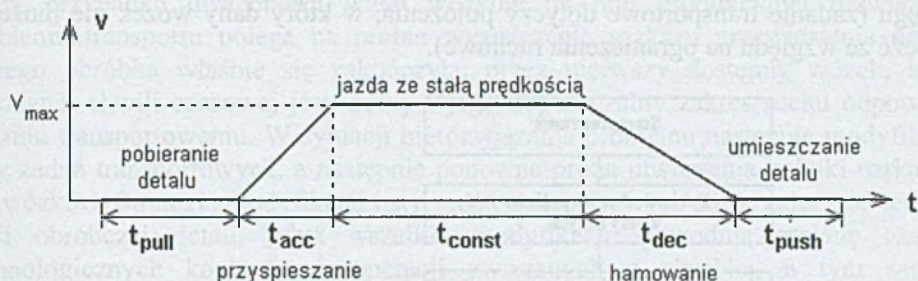
Dla tego przypadku transport detalu odbywa się 5-etapowo: pobieranie detalu, przyspieszanie wózka, jazda ze stałą prędkością, hamowanie oraz umieszczanie detalu na kolejnym stanowisku. Wartości czasów  $t_{acc}$ ,  $t_{dec}$  oraz  $t_{const}$  wyrażają się następująco:

$$t_{acc} = \frac{v_{max}}{a_{acc}} \quad (2.2)$$

$$t_{dec} = \frac{v_{max}}{a_{dec}} \quad (2.3)$$

$$t_{const} = \frac{v_{max}}{|x_m - x_n| - \frac{1}{2}(a_{acc}t_{acc}^2 + a_{dec}t_{dec}^2)} \quad (2.4)$$

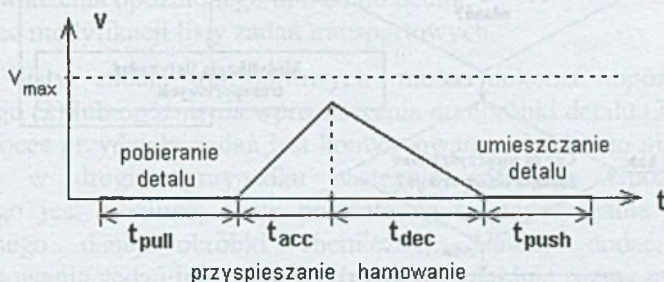




Rys. 4. Zależność prędkości wózka od czasu dla 5-etapowego zadania transportowego

Gdy zależność (2.1) nie jest spełniona, wózek nie rozpędzi się do prędkości dopuszczalnej i zadanie transportowe będzie 4-etapowe, czyli pobieranie detalu, przyspieszanie, hamowanie oraz umieszczenie detalu na kolejnym stanowisku. Wtedy  $t_{const}=0$ , zaś wartości czasu  $t_{acc}$  oraz  $t_{dec}$  będą rozwiązaniem następującego układu równań:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} a_{acc} t_{acc}^2 + \frac{1}{2} a_{dec} t_{dec}^2 = |x_m - x_n| \\ a_{acc} t_{acc} = a_{dec} t_{dec} \end{cases} \quad (2.5)$$

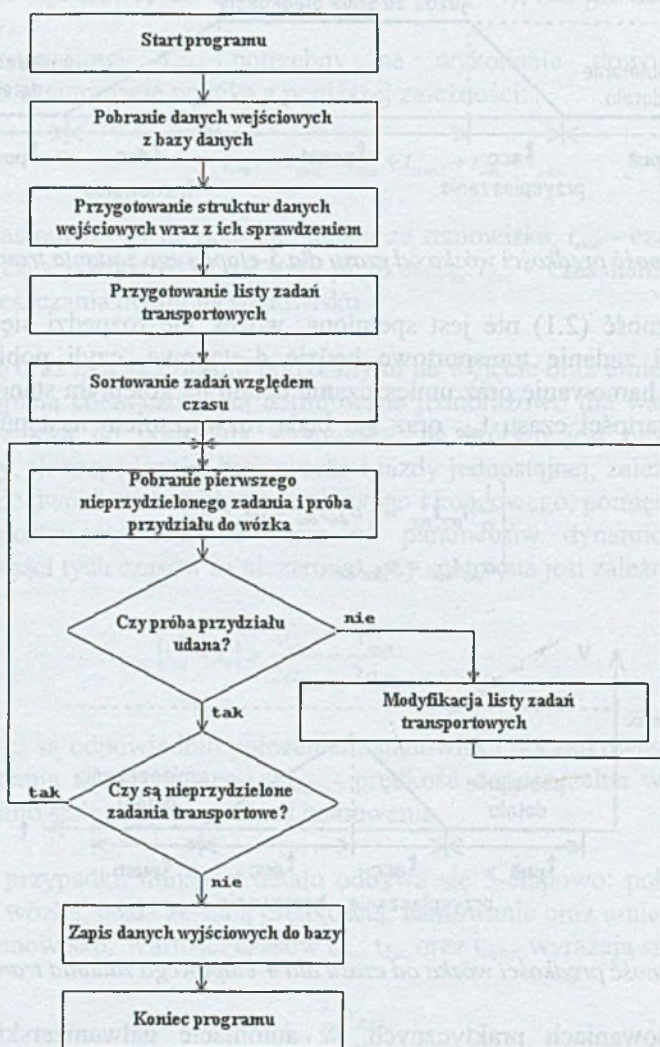


Rys. 5. Zależność prędkości wózka od czasu dla 4-etapowego zadania transportowego

W zastosowaniach praktycznych, w automacie galwanizerskim, parametry dynamiczne wózków mają dużo mniejszy wpływ na czas realizacji transportu niż prędkość maksymalna. W przypadku dostępności co najmniej dwóch wózków przemieszczenie dwóch detali w tym samym momencie jest możliwe, o ile nie nastąpią wzajemne kolizje. Skończony czas transportu pomiędzy stanowiskami obróbczymi jest szkodliwy z punktu widzenia technologii obróbki galwanicznej, dlatego powinien być możliwie najkrótszy i uwzględniany w procesie szeregowania zadań.

Do wyznaczania harmonogramu dla wózków transportowych opracowano algorytm rekurencyjny, który rozwiązuje wielokrotnie te same podproblemy [3]. Klasa podproblemów zawiera zbiór przyczyn, które uniemożliwiają wygenerowanie rozkazu transportowego dla zadanego wózka. Wśród tych przyczyn można wyróżnić problem kolizji z sąsiednim wózkiem, problem zajętości wózka innym zadaniem, problem

zasięgu (zadanie transportowe dotyczy położenia, w który dany wózek nie może się znaleźć ze względu na ograniczenia ruchowe).



Rys. 6. Algorytm harmonogramowania zadań transportowych

Proces harmonogramujący pracę wózków składa się z następujących faz roboczych:

- przygotowanie listy pojedynczych zadań transportowych związanych z przenoszeniem detali pomiędzy poszczególnymi stanowiskami;
- wyznaczanie kolejki rozkazów dla poszczególnych wózków realizujących listę zadań transportowych metodą rekurencyjną;
- proces iteracyjny, w którym następuje przydzielenie wózkom uprzednio przygotowanych zadań transportowych.



W przypadku dostępności wielu wózków na linii produkcyjnej rozwiązanie problemu transportu polega na próbie wyznaczenia rozkazu przewiezienia detalu, którego obróbka właśnie się zakończyła, przez pierwszy dostępny wózek, który w zadanej chwili czasowej jest wolny i jego dopuszczalny zakres ruchu odpowiada zadaniu transportowemu. W sytuacji nierozwiązania problemu następuje modyfikacja listy zadań transportowych, a następnie ponowna próba utworzenia kolejki rozkazów dla wózków. Strategia modyfikacji listy zadań transportowych silnie zależy od technologii obróbczej detali, gdyż wszelkie modyfikacje powodują zmianę czasów technologicznych konkretnych operacji związanych z obróbką, a tym samym wpływają na wydajność linii produkcyjnej. Dla rozważanej struktury automatu galwanizerskiego zaproponowano następujący algorytm modyfikacji listy zadań transportowych:

1. Sprawdź, czy można opóźnić bieżące zadanie transportowe o czas, który jest potrzebny na przybycie najprędzej dostępnego wózka; w przypadku spełnienia tego warunku idź do 2, jeśli nie, to do 3;
2. Opóźnij bieżące zadanie transportowe, a także wszystkie późniejsze zależne zadania transportowe względem bieżącego zadania i idź do 4;
3. Spośród przydzielonych zadań transportowych znajdź najpóźniejszy wprowadzany detal do produkcji i opóźnij rozpoczęcie jego obróbki o zdefiniowany kwant czasu, a następnie zwolnij wszystkie przydziały zadań transportowych, których chwile początkowe odpowiadają chwili wprowadzenia opóźnionego uprzednio detalu;
4. Koniec modyfikacji listy zadań transportowych.

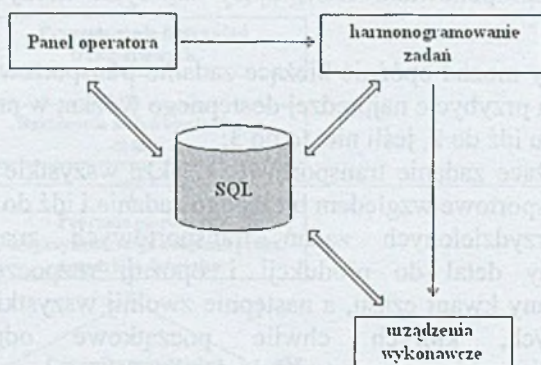
Modyfikacja listy zadań transportowych może dokonać opóźnienia zadania transportowego (2) lub opóźnienia wprowadzenia do obróbki detalu (3). W pierwszym przypadku proces przydziału zadań jest kontynuowany od ostatnio nieprzydzielonego zadania, zaś w drugim przypadku następuje cofnięcie. Opóźnienie zadania transportowego jest możliwe, o ile pozwala na to dopuszczalna odchyłka czasu technologicznego danej obróbki chemicznej. Należy dodać, iż algorytm harmonogramowania zadań transportowych zawsze znajduje rozwiązanie, gdyż nawet w najbardziej złożonym problemie istnieje rozwiązanie polegające na wprowadzaniu kolejnego detalu do produkcji po zakończeniu poprzedniego.

### 3. System sterowania nadrzędnego pracującego w czasie rzeczywistym

Schemat blokowy systemu sterowania automatem galwanizerskim został przedstawiony na rysunku 5. System składa się z urządzenia wykonawczego, panelu operatora, programu harmonogramującego oraz serwera baz danych SQL. Komunikacja pomiędzy poszczególnymi komponentami została zorganizowana za pośrednictwem sieci TCP/IP. Częścią wspólną jest serwer baz danych, który pracuje jako urządzenia pośredniczące w przekazywaniu danych, a także jest w nim odwzorowywany stan realizowanego procesu produkcyjnego. Stan ten jest aktualizowany co kilka sekund, co nie ma ujemnego wpływu na jakość sterowania, gdyż sam proces obróbki galwanicznej jest znacznie wolniejszy. Wszelkie dane o procesie produkcyjnym, tj. zlecenia produkcyjne, receptury technologiczne, zadania transportowe, znajdują się w odpowiednich tabelach w bazie danych. Zapis i odczyt



tych danych odbywa się ściśle w określonych sytuacjach. Do takich sytuacji należą wprowadzenie nowego zlecenia produkcyjnego, rozpoczęcie i zakończenie procesu harmonogramującego czy aktualizacja stanu realizowanego procesu. Komunikacja pomiędzy panelem operatora a programem harmonogramującym ogranicza się do wysłania informacji o nowo wprowadzonym zleceniu produkcyjnym. Podobnie jest z komunikacją pomiędzy programem harmonogramującym a urządzeniem wykonawczym. W tym przypadku wysyłana jest informacja o wyznaczeniu nowego sterowania. Jeśli nowo wyznaczony harmonogram nie zostanie przyjęty przez urządzenie wykonawcze, proces produkcyjny jest kontynuowany zgodnie z poprzednim harmonogramem.



Rys. 7. Schemat blokowy systemu sterowania

Odrzucenie nowego harmonogramu może być spowodowane zbyt późnym jego przekazaniem względem aktualnego stanu realizowanego procesu produkcyjnego. Obliczenia nowego harmonogramu powinny uwzględniać taki stan procesu, jaki wystąpi przed przyjęciem nowego sterowania przez urządzenia wykonawcze. W przypadku nieprzyjęcia nowego harmonogramu zostaną ustalone nowe warunki początkowe procesu produkcyjnego, a następnie program harmonogramujący zostanie uruchomiony ponownie.

#### 4. Badania eksperymentalne

Do celów eksperymentalnych wykorzystano przykład produkcji 8 detali, które były poddane 15 różnym obróbkom. Założono istnienie 3 wózków transportowych, które mają jednakowe parametry dynamiczne:  $v_{\max} = 0.4 \frac{m}{s}$ ,  $a_{\text{acc}} = a_{\text{dec}} = 1 \frac{m}{s^2}$ . Zakres ruchowy każdego z nich nie jest ograniczony (każdy może podjechać do każdego stanowiska). Liczba stanowisk w każdej grupie obróbczej określona jest przez elementy wektora:  $K = [3 \ 3 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3]$ , liczba wszystkich stanowisk (zgodnie ze wzorem (1.6)) wynosi 27, wszystkie stanowiska leżą w jednej linii (zgodnie z numeracją grup jak na Rys. 2) i są rozmieszczone równomiernie co 1 m. Założono, iż dwa wózki mogą stać na dwóch sąsiednich stanowiskach z kąpielą

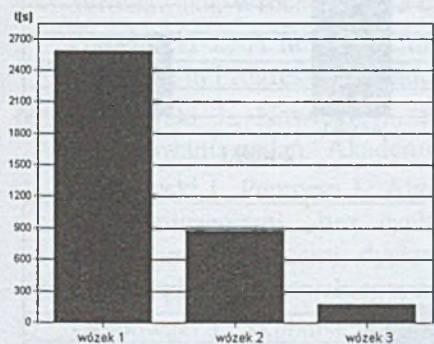


chemiczną. Założono czasy technologiczne (5 detali typu A oraz 3 detale typu B), które zapisuje się w macierzy T czasów technologicznych:

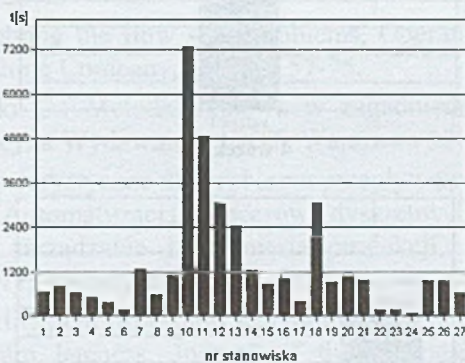
$$T = \begin{bmatrix} 300 & 300 & 300 & 300 & 150 & 150 & 150 & 300 \\ 60 & 60 & 60 & 60 & 200 & 200 & 200 & 60 \\ 150 & 150 & 150 & 150 & 120 & 120 & 120 & 150 \\ 45 & 45 & 45 & 45 & 60 & 60 & 60 & 45 \\ 200 & 200 & 200 & 200 & 0 & 0 & 0 & 200 \\ 2400 & 2400 & 2400 & 2400 & 0 & 0 & 0 & 2400 \\ 600 & 600 & 600 & 600 & 1200 & 1200 & 1200 & 600 \\ 120 & 120 & 120 & 120 & 30 & 30 & 30 & 120 \\ 180 & 180 & 180 & 180 & 0 & 0 & 0 & 180 \\ 60 & 60 & 60 & 60 & 0 & 0 & 0 & 60 \\ 600 & 600 & 600 & 600 & 0 & 0 & 0 & 600 \\ 120 & 120 & 120 & 120 & 60 & 60 & 60 & 120 \\ 200 & 200 & 200 & 200 & 300 & 300 & 300 & 200 \\ 60 & 60 & 60 & 60 & 0 & 0 & 0 & 60 \\ 300 & 300 & 300 & 300 & 300 & 300 & 300 & 300 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Założono dopuszczalne odchylenie każdego z czasów technologicznych +10%. Detale zostały ponumerowane 0...7, pierwsza kolumna macierzy T odpowiada detalowi 0, ostatnia detalowi 7. Po zakończeniu procesu szeregowania detali uzyskano najlepszą kolejność z punktu widzenia najkrótszego czasu trwania produkcji ( $C_{max}$ ):

$$J = [4 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 7 \ 5 \ 6] \quad (4.2)$$



Rys. 8. Histogram obciążenia czasowego poszczególnych wózków w rozważanym przykładzie



Rys. 9. Histogram obciążenia czasowego poszczególnych stanowisk obróbczych w rozważanym przykładzie

Wyznaczony czas trwania całego procesu produkcyjnego wyniósł 12531 s. Z histogramu obciążenia czasowego wózków (rys. 8) wynika, iż nie jest ono równomierne dla wszystkich wózków, lecz spada wykładniczo dla kolejnego wózka. Rysunek 9 przedstawia obciążenie czasowe poszczególnych stanowisk obróbczych. Na podstawie tego histogramu można zidentyfikować tzw. wąskie gardła (stanowisko 10, 11, 12, 13 oraz 18), które mają decydujący wpływ na czas trwania procesu produkcyjnego.

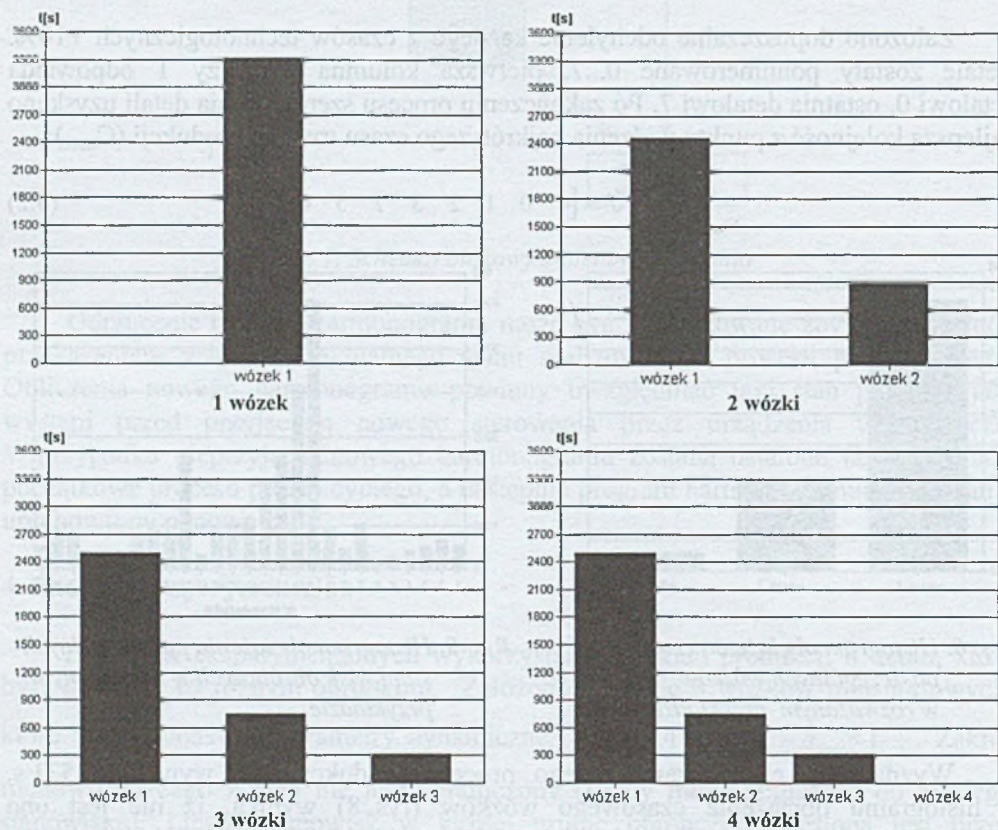
W celu porównania wpływu liczby wózków na czas trwania założonego zadania produkcyjnego wykonano obliczenia dla różnej liczby dostępnych wózków w automacie. W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń.

Tabela 1

Zestawienie czasów realizacji produkcji i średniego czasowego obciążenia wózków

Liczba dostępnych wózków transportowych	Maksymalny czas zakończenia $C_{\max}$	Średnie czasowe obciążenie wózków transportowych <sup>*)</sup>
1	18742s	17,68%
2	12628s	13,23%
3	12531s	9,42%
4	12531s	7,07%

<sup>\*)</sup> jest to średni czas pracy wszystkich wózków podzielony przez czas trwania realizacji produkcji ( $C_{\max}$ ) i pomnożony  $\times 100\%$



Rys. 10. Zestawienie obciążeń wózków dla różnej ich liczby w automacie w rozważanym przykładzie

Dodatkowo wykonano obliczenie teoretycznego czasu trwania procesu produkcyjnego, przy założeniu że kolizje wózków nigdy nie występują, a także liczba



wózków jest zawsze wystarczająca do wykonania każdego zadania transportowego. Czas ten wyniósł 12531 s i jest on osiągalny przy min. 3 wózkach transportowych istniejących w automacie. W rozpatrywanym przykładzie dodanie 4 wózka nie wpłynęło na wydajność, dodawanie kolejnych nie ma także znaczenia z punktu widzenia wydajności linii.

Oprogramowanie do symulacji zostało opracowane w pełni przez autora pracy w środowisku graficznym C++ (MS Visual Studio 2003 .NET) z wykorzystaniem serwera bazy danych PostgreSQL w wer. 8.2.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bożejko W., Grabowski J., Pempera J.: Nowy algorytm lokalnej optymalizacji dla zagadnienia kolejnościowego przepływowego. *Automatyka* 2001, 1/2, 77-80.
2. Brown A.P., Łomnicki Z.A.: Some applications of the branch and bound algorithm to the machine scheduling problem. *Operational Research Quartely*. 17, No.2, 1966, p. 173-186.
3. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C.: *Introduction to Algorithms*. 2nd ed. MIT Press & McGraw-Hill, 2001.
4. Dębowski A., Gisko R. M.: Elastyczne harmonogramowanie pracy systemu przepływowego. *Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe*, s. 105-114, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006, VI Krajowa Konferencja Naukowa Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe, Politechnika Wroclawska, Wrocław 21-23 czerwca 2006.
5. Grabowski J.: A new algorithm of solving the flow shop problems. *Operations Research in Progress*. D. Reidel Publishing Company, 1982, p. 57-75.
6. Grabowski J., Nowicki E., Smutnicki C.: *Metoda blokowa w zagadnieniach szeregowania zadań*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
7. Grabowski J., Pempera J.: Algorytmy heurystyczne dla problemu przepływowego z ograniczeniami „bez czekania”. *Automatyzacja procesów dyskretnych – Sterowanie procesami dyskretnymi, zarządzanie i inżynieria produkcji*, pod redakcją M. Zaborowskiego, s. 55, WNT, Warszawa 2004.
8. Grabowski J., Skubalska E., Smutnicki C.: On flow-shop scheduling with release and due dates to minimize maximum lateness. *Journal of the Operational Research Society* 1983, 34, p. 615-620.
9. Graham R. L., Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A.H.G.: Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling. *Ann. Discrete Math.*, 1979, 5, p. 287-326.
10. Honczarenko J., Berliński A.: Model operacyjnego harmonogramowania produkcji w elastycznych systemach wytwarzania z centralnym magazynowaniem i transportem międzystanowiskowym. *Automatyzacja procesów dyskretnych – Sterowanie procesami dyskretnymi zarządzanie i inżynieria produkcji*, pod redakcją M. Zaborowskiego, s. 201-209, WNT, Warszawa 2004.



11. Hurink J., Knust S.: Makespan minimization for flow-shop problems with transportation times and a single robot. *Discrete Applied Mathematics*, 2001, 112, p. 199-216.
12. Janiak A., Kozan E., Lichtenstein M., Oğuz C.: Metaheuristic approaches to the hybrid flow shop scheduling problem with a cost-related criterion. *International Journal of Production Economics* 105 (2007), p. 407-424.
13. Janiak A.: Wybrane problemy i algorytmy szeregowania zadań i rozdziału zasobów. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1999.
14. Lu Zheng, Xingsheng Gu: Fuzzy Production Scheduling in No-wait Flow shop to Minimize the makespan with E/T Constraints using SA. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 15-19, 2004, Hangzhou, P.R. China.
15. Nowicki E., Smutnicki C.: A fast tabu search algorithm for the permutation flow shop problem. *European Journal of Operational Research* 1996, 91, p. 160-75.
16. Nowicki E.: An approximation algorithm for the m-machine permutation flow shop scheduling problem with controllable processing times, *European Journal of Operational Research*, 1993, 70, p. 342-349.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ewa Dudek-Dyduch

## Abstract

This paper presents a problem of transport tasks scheduling in the galvanizing plant which is no-wait flow shop system. The problem of task scheduling is already defined and actually many of various algorithms for this problem are developed. Nevertheless for practical application many algorithms do not take into consideration all expected limitations. Fundamental applicability limitation of any scheduling algorithm is a conservation of technology time. In the case of galvanizing plant the main problem is a transport scheduling because transport problem causes difficulties with continuity keeping of production process and technological time limit. It's very important, because the started production process cannot be interrupted or stopped. In addition the transport problem causes that an optimal solution doesn't exist. It is only possible to approximate a suboptimal schedule. The transport problem in galvanizing plant is connected with transfer of details between planting tanks in the production line. This transfer is realized by industrial carriages which run on the same running rail, so that none of them can be passed by another one. In this work it is presented a new developed algorithm which can be used to schedule of transport tasks in galvanizing plant.