ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: AUTOMATYKA z. 55 Nr kol. 651

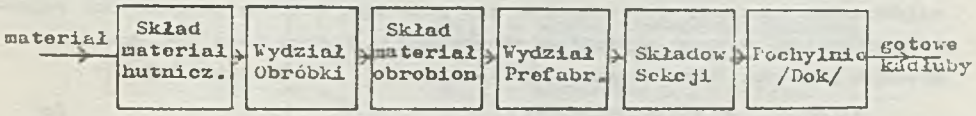
Andrzej Piegat, Janusz Szaban
Politechnika Szczecińska

HARMONOGRAMOWANIE PROCESU PRODUKCYJNEGO W STOCZNI

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano specyfikę procesu produkcyjnego w stoczni na wydziale obróbki kadłubów, przedstawiono uproszczony model procesu oraz metodę tworzenia harmonogramu w oparciu o zaproponowany heurystyczny algorytm szeregowania prac na maszynach.

1. Wstęp

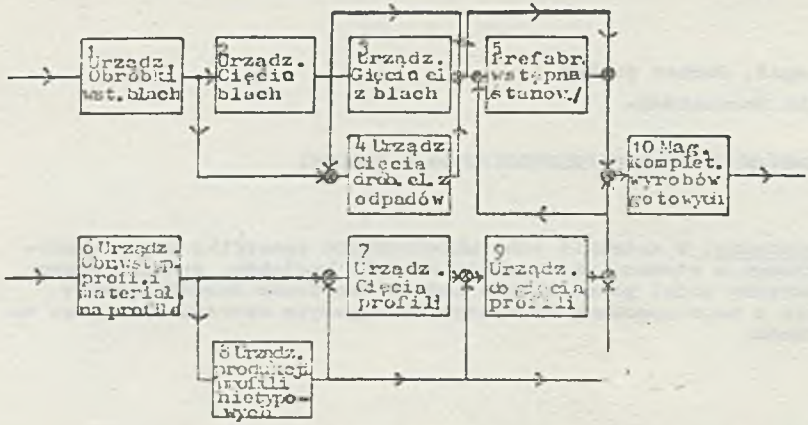
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie pewnej metody harmonogramowania zastosowanej w produkcyjnym procesie stoczniowym, a ściśle, na wydziale obróbki kadłuba stoczni. Umiejscowienie tego wydziału w strukturze produkcyjnej stoczni obrazuje rys. 1.



Rys. 1. Przepływ materiałów w stoczni

Na wydziale obróbki kadłuba W.O.K. materiały hutnicze /blachy i profile/ oczyszczane są z zendry i innych zanieczyszczeń /ewentualnie odladzane/, a następnie poddawane obróbce cięcia i gięcia, w wyniku której uzyskuje się elementy do montażu sekcji statku. Elementy wyjściowe z wydziału obróbki kadłuba przechowywane są na składzie materiałów obrobionych, skąd partiami pobierane zostają przez wydział prefabrykacji montujący je w gotowe sekcje. Charakterystyczny jest fakt, że W.O.K. produkuje elementy nie w sposób dowolny, lecz partiami tworzącymi pewną całość w sensie technologicznym. Partie te określa się przykładowo w Stoczni im. Komuny Paryskiej w Gdyni "zespołami obróbczymi" i stanowią one zestaw elementów, z których wyprodukować można jedną sekcję płaską statków lub część sekcji przestrzennej. Należy zaznaczyć, że W.O.K. produkuje jednocześnie wiele zespołów obróbczych i że należy dążyć do tego, aby czas pomiędzy wyprodukowaniem pierwszego i ostatniego elementu danego zespołu obróbczego nie był zbyt duży, gdyż inaczej gotowa część zespołu blokuje powierzchnię magazynową w oczekiwaniu na ostatni element tego zespołu obróbczego. Powoduje to tzw. zamrożenie materiału i zwiększenie kosztów i strat magazynowania /zaginięcia elementów/. Wewnętrzną strukturę W.O.K. oraz prze-

pływ materiałów pomiędzy elementami tej struktury przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Wewnętrzny przepływ materiałów na W.O.K.

Przez optymalny harmonogram procesu rozumie się taki harmonogram, który każdej operacji technologicznej η_i, realizowanej w procesie, przyporządkowuje stanowisko q_k, na którym będzie ona realizowana, oraz określa moment rozpoczęcia tej operacji t_i^x oraz jej zakończenia t_i^y, przy czym przyporządkowanie operacji do stanowisk nie może być dowolne; powinno ono zapewnić optymalną wartość kryterium sterowania Ω, którym może być np. czas trwania procesu. Harmonogram optymalny można wyrazić jako:

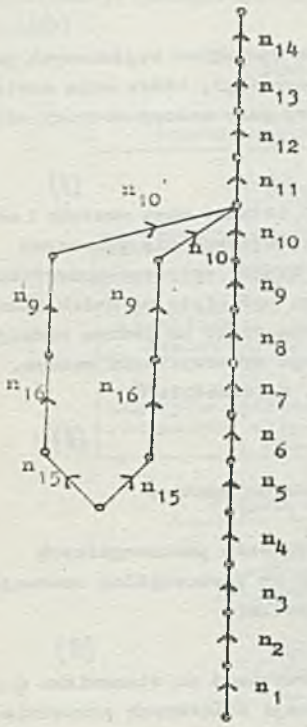
$$\Lambda = \{\langle \eta_i, q_k, t_i^x, t_i^y \rangle : (\Omega = \Omega_{opt}) \wedge \omega_1 \wedge \omega_2 \ldots \wedge \omega_{10}\} \tag{1}$$

gdzie $\omega_1 \div \omega_{10}$ warunki charakteryzujące proces na W.O.K. Warunek ω_1 określa zbiór operacji $\Theta = \{\eta_1, \ldots, \eta_p\}$, jakie mogą zostać zrealizowane przy założonym wyposażeniu wydziału. Warunek ω_2 określa zbiór $Q = \{q_1, \ldots, q_r\}$ maszyn biorących udział w procesie produkcyjnym. Warunek ω_3 określa porządek technologiczny R_T, czyli kolejność wykonywania operacji. Porządek ten nie jest na wydziale obróbki kadłuba dowolny. Nie można np. wykonywać operacji cięcia blach przed ich oczyszczeniem, lub operacji gięcia elementu przed jego wycięciem z arkusza blachy. Porządek technologiczny określony jest zbiorem par operacji $\langle \eta_i, \eta_j \rangle$, przy czym zależność (2)

$$\langle \eta_i, \eta_j \rangle R_T \tag{2}$$

zachodzi wówczas, gdy operacja η_i musi zostać wykonana przed operacją η_j. Rysunek 3 przedstawia porządek technologiczny blach ciętych optycznie, prefabrykowanych, zobrazowany za pomocą grafu. Warunek ω_4 określa czasowy zakres harmonogramowania. Czas (t) rozpatrywany w procesie jest między momentem rozpoczęcia procesu (t_0) oraz momentem zakończenia (t_z):

$$\begin{aligned} t - t_0 &\geqslant 0 \\ t_z - t &\geqslant 0 \end{aligned} \tag{3}$$



n_1 - sprawdz.mater.
n_2 - prostowanie
n_3 - odzendrzanie
n_4 - konserwacja
n_5 - opis po malowaniu
n_6 - cięcie optyczne
n_7 - opis, znakowanie, przepalanie mostków
n_8 - kompletacja po cięciu
n_9 - kompletacja przed montażem
n_{10} - montaż
n_{11} - spawanie
n_{12} - prostowanie
n_{13} - gradowanie, popr., malowanie
n_{14} - kompletacje
n_{15} - cięcia drobnych elementów Suprarexem
n_{16} - kompletacja po cięciu Suprarexem

Rys. 3. Proces produkcyjny blach ciętych optycznie prefabrykowanych

Warunek ω_5 dotyczy okresów niedyspozycyjności maszyn i urządzeń, które opisane są ciałem zbiorów:

$$\Psi = \{\psi^1, \ldots, \psi^r\} \tag{4}$$

Zbiory ψ^k dotyczą poszczególnych maszyn i podają momenty rozpoczęcia t_p^{*k} i zakończenia t_p^{yk} konkretnych okresów niedyspozycyjności. Okresy niedyspozycyjności spowodowane są remontami planowanymi i naprawami awarii maszyn. Warunek ω_6 określa stosunek ilości elementów wejściowych $\overline{\overline{\Pi}}_i$ i wyjściowych $\overline{\overline{\Pi}}_i$ operacji realizowanych na W.O.K. Jego postacią matematyczną jest (5):

$$(\overline{\overline{\Pi}}_i = \overline{\overline{\Pi}}_i) \vee (\overline{\overline{\Pi}}_i > \overline{\overline{\Pi}}_i) \vee (\overline{\overline{\Pi}}_i < \overline{\overline{\Pi}}_i) = 1 \tag{5}$$

Podana zależność opisuje matematycznie fakt, że na wydziale obróbki kadłuba realizowane są jednocześnie operacje rozdzielcze /cięcie blach i profili/, obróbkowe /np. gięcie/oraz montażowe /prefabrykacja wstępna/. Odróżnia to ten wydział od innych wydziałów stoczni, gdzie realizowane są przede wszystkim operacje montażowe. Warunek ω_7 dotyczy niedyspozycyjności elementów wejściowych procesu spowodowanych opóźnieniem dostawy mate-

riałów. Zbiór:

$$\Xi = \{t^{x\theta_1}, \ldots, t^{x\theta_v}\} \tag{6}$$

podaje początki dyspozycyjności poszczególnych elementów wejściowych procesów. Warunek ω_8 procesu określa zbiory θ^k operacji, które mogą zostać wykonane na poszczególnych maszynach q_k. Każdej pary maszyn dotyczy zależność (7):

$$(\theta^k \cap \theta^l \neq \emptyset) \vee (\theta^k \cap \theta^l = \emptyset) = 1, \quad k,l: q_k \in Q, q_l \in Q \tag{7}$$

która mówi, że w zbiorze maszyn i stanowisk Q istnieć mogą maszyny i stanowiska q_k, q_l o częściowo lub całkowicie pokrywających się zakresach operacji. Przykładem są tu automaty do cięcia blach: optyczno-numeryczne i optyczne. Blachy z dokumentacją optyczną mogą być cięte na dwóch rodzajach automatów, blachy z dokumentacją numeryczną tylko na jednym rodzaju. Warunek ω_9 dotyczy równomiernego i dostatecznego wykorzystania maszyn. Czas zatrudnienia maszyny określony jest m.in. zależnością (8):

$$T^k \geqslant p^k_{min}(t_z - t_o) \tag{8}$$

gdzie: T^k - czas zatrudnienia maszyny q_k,

p^k_{min} - współczynnik minimalnego wykorzystania maszyny,

$(t_z - t_o)$ - czas trwania procesu.

Warunek ω_{10} dotyczy czasu rozpoczynania i zakończenia poszczególnych operacji technologicznych. Zależność (9) oznacza, że poszczególne operacje mogą być przerywane remontami planowanymi i awariami

$$t_i^y - t_i^x \geqslant N(\eta_i, q_k) \quad dla \ \eta_i \in \theta, q_k \in Q \tag{9}$$

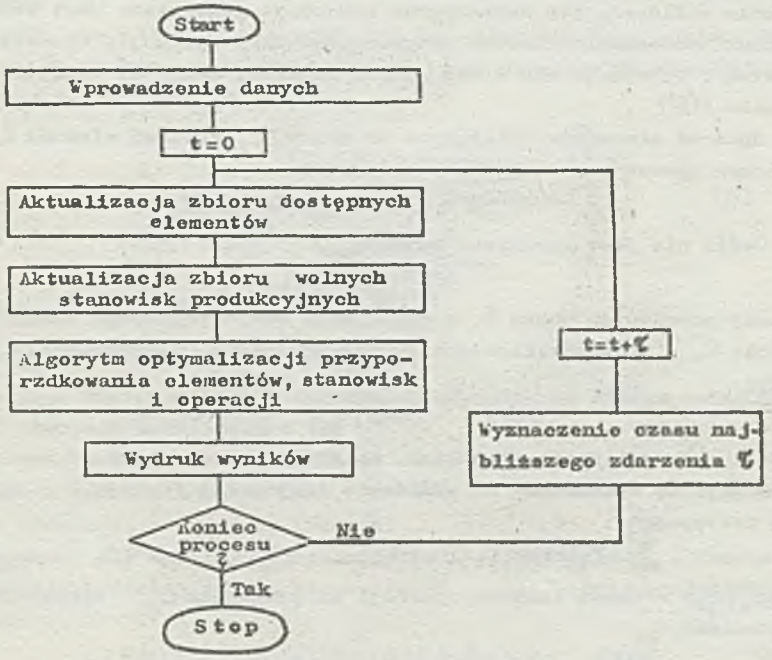
gdzie: $N(\eta_i, q_k)$ - norma czasowa operacji η_i wykonywanej na stanowisku q_k. Zależność (10) określa kolejność wykonywania operacji związanych porządkiem technologicznym R_T:

$$t_j^x - t_i^y \geqslant 0 \quad dla \ \eta_i, \eta_j \in R_T \tag{10}$$

Poniżej przedstawiono koncepcję heurystycznego algorytmu generacji sekwencji sterujących, przeznaczonego dla dość szerokiej klasy procesów, w tym również opisanych powyżej procesów stoczniowych. Algorytm optymalizacji jest częścią programu symulacyjnego, pozwalającego na tworzenie pełnego harmonogramu przebiegu produkcji. Program ten został napisany w języku FORTRAN na maszynę cyfrową HP 2100A; jego uproszczony schemat blokowy przedstawiono na rys. 4. Algorytm optymalizacji realizuje w każdym cyklu symulacji następujące zasadnicze strategie wyboru decyzji sterujących:

1. Wybór i rozpoczęcie operacji limitujących w chwili aktualnej t minimalny czas realizacji procesu.
2. Analiza sytuacji na głębokość następnego kroku oraz ewentualna rezerwacja stanowisk dla operacji, których nie można rozpocząć w chwili t, a które będą limitowały minimalny czas realizacji procesu w chwili t_1 /poniżej określono, co to jest czas t_1 /.
3. Analiza perspektywiczna i wybór decyzji sterujących, umożliwiających

optymalizację przeprowadzenia procesu produkcyjnego przez tzw. "wąskie gardła".



Rys. 4. Schemat blokowy programu symulacyjnego

Algorytm ten można przedstawić w uproszczeniu w postaci następujących kroków:

1. Spośród elementów należących do zbioru $\bar{E}_t$ znaleźć element E_k^l, dla którego operacja ma najwyższy priorytet:

$$\forall i,j, E_i^j \in \bar{E}_t : \; P(E_k^l) = \max_{i,j} P(E_i^j) \tag{11}$$

gdzie: $\bar{E}_t = E - E_t$ - jest to dopełnienie zbioru elementów E /zbiór elementów, na których nie można rozpocząć operacji w chwili t /,

$E_t \subset E$ - zbiór elementów E_i^j, na których można rozpocząć operację w chwili t /dostępnych fizycznie/,

$E = \{E_i^j\}$ - zbiór wszystkich elementów, występujących w procesie,

$j = 1, 2, \ldots, j_{max}$ - numer produktu,

$i = 1, 2, \ldots, i_{max}(j)$ - numer elementu w produkcie,

$P(E_i^j)$ - priorytet operacji na elemencie E_i^j; jest to średni czas realizacji wszystkich operacji w danej gałęzi, poczynając od operacji na elemencie E_i^j aż do końca gałęzi. Wielkość ta jest sumą norm czasowych wszystkich operacji do końca gałęzi, powiększoną o średnie długości kolejek dla operacji będących "wąskimi gard-

łami". Wielkości $P(E_i^j)$ dla wszystkich elementów wyznaczone są w pierwszym etapie obliczeń, gdy harmonogram produkcji generowany jest szereg razy metodą Monte-Carlo /losowe przyporządkowanie operacji, elementów i stanowisk/. Otrzymuje się w ten sposób rozkłady długości kolejek i rozkłady czasów $P(E_i^j)$.

2. Spośród elementów należących do zbioru E_t znaleźć element E_m^n , dla którego operacja ma najwyższy priorytet:

$$\forall i,j, E_i^j \in E_t : P(E_m^n) = \max_{i,j} P(E_i^j) \tag{12}$$

3. Jeśli nie jest spełniona relacja:

$$P(E_m^n) \geqslant P(E_k^l) \tag{13}$$

należy przejść do kroku 5. W przeciwnym razie rozpocząć operację na elemencie E_m^n , przyporządkowując jej stanowisko q_w o najkrótszej normie czasowej:

$$\forall v, q_v \in Q^g : N(E_m^n, q_w) = \min_v N(E_m^n, q_v) \tag{14}$$

gdzie: Q^g - zbiór stanowisk, na których można wykonać operację η_g ; operację tę wyznaczamy na podstawie znajomości funkcji ξ , zdefiniowanej następująco:

$$\xi : E_m^n \to \eta_g , \quad n = 1,2,\ldots,n_{max} , \quad m = 1,2,\ldots,m_{max}(n) .$$

$N(E_m^n, q_v)$ - norma czasowa operacji na elemencie E_m^n , wykonywanej na stanowisku q_v :

$$N(E_m^n, q_v) = N(\eta_i, q_v) , \quad \text{gdzie} \quad \eta_i = \xi(E_m^n) .$$

Jeśli normy czasowe są jednakowe dla kilku stanowisk, wówczas należy wybrać stanowisko q_w o najmniejszej uniwersalności względnej $W(M_t^w)$:

$$\forall v, q_v \in Q^g, N(E_m^n, q_v) = x : W(M_t^w) = \min_v W(M_t^v) \tag{15}$$

gdzie:

$x = \min_v N(E_m^n, q_v)$ dla $q_v \in Q^g$,

M^v - zbiór operacji, które można zrealizować na stanowisku q_v ,

$M_t^v \subset M^v$ - zbiór operacji, które można zrealizować na stanowisku q_v w chwili t /tzn. dostępne są w chwili t konieczne elementy/,

$W(M^v)$ - moc zbioru M^v /ilość różnych operacji, które można zrealizować na stanowisku q_v /, zwana dalej uniwersalnością bezwzględną stanowiska q_v ,

$W(M_t^v)$ - moc zbioru M_t^v - inaczej uniwersalność względna stanowiska q_v.

Jeśli okaże się, że również uniwersalność względna dla pewnych stanowisk będzie identyczna, wówczas należy wybrać stanowisko o najmniejszej uniwersalności bezwzględnej $W(M^w)$:

$$\forall v, q_v \in Q^g, N(E_m^n, q_v) = x , W(M_t^v) = y : W(M^w) = \min_v W(M^v) \tag{16}$$

gdzie:

$y = \min_v W(M_t^v)$ dla $q_v \in Q^g$.

4. Kroki 2 i 3 wykonać dla wszystkich elementów ze zbioru E_t, spełniających warunek (13).
5. Sprawdzić, czy istnieje operacja /np. na elemencie E_p^q /, która musi być wykonywana na tym samym stanowisku q_w co operacja na elemencie E_m^n i która spełnia następujące warunki:

$$\left.\begin{array}{l} E_p^q \notin E_t , \\ E_p^q \in E_{t_1} , \quad t < t_1 \leqslant t + N(E_m^n, q_w) , \\ P(E_p^q) - P(E_m^n) > t_{mn_{min}} - t_{pq_{min}} , \end{array}\right\} \qquad (17)$$

gdzie:

$$t_{mn_{min}} = min(t_{mn}, t_1 + N(E_p^q, q_w)) ,$$

$$t_{pq_{min}} = min(t_{pq}, t + N(E_m^n, q_w)) ,$$

t_{mn} - czas zwolnienia najbliższego stanowiska, na którym można będzie wykonywać operację na elemencie E_m^n,

t_{pq} - czas zwolnienia najbliższego stanowiska, na którym można będzie wykonać operację na elemencie E_p^q.

Jeśli nie istnieje, przejść do kroku 8.
6. Zarezerwować dla operacji na elemencie E_p^q stanowisko q_w. Jeżeli istnieje operacja krótsza, np. na elemencie E_r^s, dla której spełniona jest nierówność:

$$t + N(E_r^s, q_w) \leqslant t_1 , \qquad (18)$$

należy rozpocząć jej wykonywanie na stanowisku zarezerwowanym.
7. Powtórzyć krok 6 dla wszystkich elementów E_p^q, spełniających warunki (17).
8. Jeśli taki element E_p^q nie istnieje, wówczas sprawdzić, czy w gałęzi operacji na elemencie E_m^n istnieje wąskie gardło. Jeśli nie istnieje - rozpocząć operację na elemencie E_m^n. Jeśli istnieje wąskie gardło - sprawdzić, czy istnieją inne gałęzie z tym samym wąskim gardłem. Jeśli tak - wykonać operację /np. na elemencie E_x^y / o najkrótszej odległości /suma norm czasowych/ od wąskiego gardła, a przy równych odległościach - o największym priorytecie $P(E_x^y)$. W przeciwnym wypadku wykonać operację na elemencie E_m^n.
9. Powtórzyć kroki 5÷8 dla wszystkich elementów ze zbioru E_t.

Przedstawiony powyżej algorytm zapewnia co prawda jedynie sub-optymalne rozwiązania / jak zresztą wszystkie algorytmy heurystyczne/, jednakże jest to w zasadzie jedyne możliwe w praktyce podejście do zagadnienia optymalizacji sterowania złożonymi dyskretnymi procesami produkcyjnymi. Omówiony algorytm da się zastosować do dowolnie złożonych przypadków, bowiem maksymalne wymiary procesu zależą jedynie od pojemności dostępnej pamięci / czas obliczeń jest bardzo krótki/. Metodę zweryfikowano na przykładzie kilku różnych procesów stoczniowych /między innymi dla omówionego uprzednio wydziału obróbki kadłuba oraz dla tzw. zintegrowanej kadłubowni-

- połączone wydziały obróbki kadłuba i prefabrykacji/. Do oceny jakości otrzymywanych harmonogramów używano wygenerowane metodą Monte-Carlo rozkłady rozwiązań losowych, uzyskując za każdym razem pozytywny wynik weryfikacji, co potwierdziło praktyczną przydatność zaprezentowanej metody.

LITERATURA

[1] Conway R.W., Maxwell W.L., Miller L.W.: Theory of Scheduling, Addison - Wesley, Reading, Mass. 1967

[2] Muth J.F., Thompson R.: Industrial Scheduling. Prentice - Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1963.

[3] Piegat A.: Modelowanie przebiegu produkcji na wydziale obróbki kadłubów w stoczni. Materiały konferencji nt. "Zastosowanie komputerów w przemyśle", Szczecin 1978.

[4] Piegat A.: Propozycja metodyki modelowania matematycznego nieciągłych procesów produkcyjnych na przykładzie budowy statku. Praca doktorska, Politechnika Szczecińska 1979.

[5] Piegat A., Sołdek J., Szaban J.: Optimierung der Steurung von Montageprozessen mit der Anwendung von Computersimulation. Internationales Schiffstechnisches Symposium "Wissenschaftliche Grundlagen Schiffbaulicher Montageprozesse" , Rostock 1977.

[6] Szaban J.: Metoda optymalizacji sterowania sekwencyjnego złożonymi procesami produkcyjnymi. Materiały konferencji nt. "Zastosowanie komputerów w przemyśle", Szczecin 1978.

СОСТАВЛЕНИЕ ГРАФИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА В ВЕРФЬЕ

Р е з ю м е

В статье характеризуется специфика производственного процесса в цеху обработки корпусов судов, представляется приближенная модель процесса а также метод построения производственного графика на основе предложенного эвристического алгоритма чередования операций на рабочих местах.

SCHEDULING OF THE PRODUCTION PROCESS IN THE SHIPYARD

S u m m a r y

The paper gives a characteristic of the production process in a shipyard's hullbuilding department. A simplified model of the process and the scheduling method based on the heuristic algorithm for the sequencing tasks for machine tools are described.