

Zdzisław Jurczyk, Franciszek Marecki  
Politechnika Śląska

## HARMONOGRAMOWANIE PROCESU WYTŁACZANIA BLACH KAROSERYJNYCH

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono zagadnienia harmonogramowania produkcji blach karoseryjnych. Dla przyjętych założeń sformułowano model obiektu tłoczni i procesu wytłaczania oraz podano heurystyczny algorytm rozwiązania problemu harmonogramowania.

### 1. Wstęp

Jednym z problemów często występujących w praktyce przemysłowej jest zagadnienie rozdzielenia zadań produkcyjnych między maszyny, czyli ustalenie harmonogramów pracy. Produkcja wytłoczek karoseryjnych jest wielooperacyjnym procesem technologicznym i wyrób końcowy otrzymuje się w wyniku wykonania szeregu operacji tłoczenia w określonej kolejności na odpowiednich typach pras. Każda zmiana wykonywanego typu detalu wiąże się z koniecznością zmiany oprzyrządowania pras, tj. ich przebrojeniem będącym przyczyną przestoju maszyn. Przyczyną przestoju może być również niewłaściwy przydział detali do maszyn prowadzący do sytuacji, w których w danej chwili liczba i typ nieobciążonych maszyn nie pozwalają na produkcję jakiegokolwiek wytłoczki.

Optymalizacja harmonogramowania ma na celu maksymalizację wydajności tłoczni przy ograniczeniach wynikających ze struktury organizacyjno-technologicznej zakładu. Osiągnąć to można przez minimalizację czasu przestoju pras.

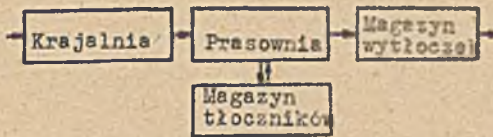
### 2. Opis obiektu i procesu tłoczenia.

Na Tłoczni Ciężkiej (Prasowni) pracuje na linii pras. [1], [2], [5], [6] Każda z linii składa się z m. pras, przy czym pierwsza prasa w każdej linii tzw. prasa podwójnego działania ma większą siłę nacisku niż pozostałe o jednakowym tonażu w danej linii. Pomiedzy poszczególnymi prasami znajdują się urządzenia ułatwiające transport międzyoperacyjny. Produkcja każdej wytłoczki wymaga wykonania szeregu operacji tłoczenia, potokowo, na określonych typach pras tworzących podciąg danej linii. Przed przystąpieniem do produkcji należy odpowiedni podciąg pras zbroić, czyli zamontować na nich tłoczniaki. Produkcyjny proces tłoczenia następuje dopiero po wykonaniu serii próbnej wytłoczek i dopuszczeniu zazbrojonego podciągu pras do pracy (czyli po tzw. czasie dostosowania). Po wykonaniu zaplanowanej serii danego detalu prasy należy rozbroić.

Obiektami współpracującymi z Prasownią są:

1. Krawalnia - gdzie przygotowuje się wykroje blach poddawane dalszej obróbce na tłoczni;
2. Magazyn Wytłoczek (czyli wyrobów gotowych);
3. Magazyn Tłoczników, gdzie przechowuje się nie wykorzystywane w danej chwili tłoczniaki.

Obiekty te nakładają dodatkowe ograniczenia na harmonogram pracy tłoczni. Przedmiotem rozważań w niniejszej pracy jest harmonogramowanie procesu wytłaczania na Prasowni. Zakładamy, że ograniczenia wynikające ze współpracujących z nią obiektów ujęte zostały przy obliczeniu planu produkcji i nie wprowadzają zakłóceń do realizacji harmonogramów. Schemat przepływu materiałów pomiędzy tymi obiektami przedstawiony został na rys. 1.



Rys.1. Schemat przepływu materiałów pomiędzy współpracującymi z prasownią obiektami.

### 3. Model obiektu i procesu tłoczenia.

Ze względu na złożoność obiektu rzeczywistego, dużą liczbą czynników określających jego stan model ten zachowuje tylko najbardziej charakterystyczne cechy obiektu rzeczywistego istotne dla potrzeb harmonogramowania produkcji.

#### 3.1. Struktura urządzenia

Strukturę urządzeniową tłoczni odwzorować można macierzą urządzeń  $\underline{U}$  [5].

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ u_{i1} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ u_{n1} & \dots & \dots & u_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie:  $u_{ij}$  - tonaż  $j$ -tej prasy w  $i$ -tej linii,

$m$  - maksymalna liczba pras w linii,  $m = \max_{1 \leq i \leq n} \{n_i\}$

$n$  - liczba linii pras.

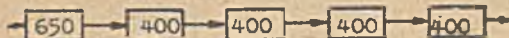
Ze względu na różną liczbę pras w linii niektóre elementy macierzy  $\underline{U}$  odpowiadające prasom nieistniejącym - są zerowe.

#### 3.2. Asortyment produkowanych wytłoczek

Na tłoczni produkowanych jest  $L$  wytłoczek karoseryjnych. Każda z nich charakteryzowana jest przez:

- wykaz ciągów detalooperacji (wykaz operacji, jakie należy wykonać, aby uzyskać wyrób finalny);
- jednostkowy czas operacji tłoczenia;
- czas zazbrojenia podciągu pras potrzebnego do produkcji danego detalu;
- czas rozbrojenia;
- czas dostosowania.

Zbiór wszystkich produkowanych wytłoczek przedstawić można za pomocą macierzy  $\underline{D}$ , której wiersze opisują poszczególne detale.



Rys.2. Przykładowy ciąg detalooperacji 1-tego detalu: tonaż pras potrzebnych do jego realizacji.

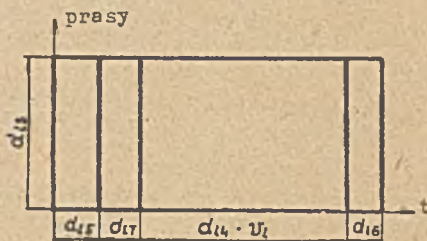
$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{17} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{L1} & \dots & \dots & d_{L7} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

- gdzie:  $d_{11}$  - numer identyfikacyjny 1-tego detalu;  
 $d_{12}$  - tonaż prasy, na której wykonywana jest 1-sza operacja tłoczenia przy produkcji 1-tego detalu;  
 $d_{13}$  - liczba pras potrzebnych do realizacji 1-tego detalu;  
 $d_{14}$  - jednostkowy czas operacji tłoczenia;  
 $d_{15}$  - czas zazbrojenia podciągu pras do produkcji 1-tego detalu;  
 $d_{16}$  - czas rozbrojenia podciągu pras;  
 $d_{17}$  - czas uruchomienia produkcji (czas dostosowania) 1-tego detalu;  
 $L$  - liczba produkowanych na tłoczni detali.

W interpretacji geometrycznej (rys. 3) cykl produkcyjny każdej wyłoczki przedstawić można w postaci prostokąta o szerokości równej liczbie pras, na których jest tłoczony  $d_{13}$ , i długości równej całkowitemu czasowi produkcji określonej liczby sztuk tego detalu. Całkowity czas produkcji jest sumą czasu zazbrojenia podciągu pras, czasu dostosowania, czasu efektywnej produkcji (iloczyn jednostkowego czasu tłoczenia i liczby sztuk) i czasu rozbrojenia.

$$t_c(1) = d_{15} + d_{17} + d_{14} \cdot v_1 + d_{16}$$

$v_1$  - długość produkowanej serii 1-tego detalu określona zamówieniem na ten detal.



Rys. 3. Cykl produkcyjny 1-tego detalu w interpretacji geometrycznej.

### 3.3. Model procesu wytłaczania

Stan zajętości pras w chwili rozpoczęcia harmonogramowania opisany jest macierzą  $P^0$ .

$$P^0 = \begin{bmatrix} p_{11}^0 & \dots & p_{1m}^0 \\ \vdots & & \vdots \\ p_{n1}^0 & \dots & p_{nm}^0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

gdzie:  $p_{ij}^0 > 0$  - czas zajętości  $j$ -tej prasy w  $i$ -tej linii, czyli czas (liczony od początku okresu harmonogramowania), po którym ta prasa zostanie zwolniona.

Elementom  $p_{ij}^0$ , odzworowującym prasy nie istniejące, nadajemy w macierzy  $P^0$  wartości czasu zajętości większe od okresu harmonogramowania, w związ-

ku z czym są one traktowane jako "stale zajęte".

Decyzję o przydziale nowych detali do realizacji można podejmować tylko wtedy, gdy prasy są niezajęte, czyli jeśli odpowiadające im elementy macierzy  $P$  są niedodatnie [1], [3], [5].

**Definicja:** Stan tłoczni, w którym conajmniej jeden element macierzy  $P$  jest niedodatni nazywamy stanem istotnym.

$k$ -ty stan istotny uzyskujemy przez odjęcie od macierzy zajętości pras  $P_z^{k-1}$  - macierzy  $I^k$ .

$$P_z^k = P_z^{k-1} - I^k \quad /5/$$

Wszystkie elementy macierzy  $I^k$  równe są:

$$t^k = \min_{i,j} \{p_{ij}^{k-1}\}, \quad /i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m/ \quad /6/$$

A zatem dla stanu istotnego zgodnie z definicją spełniony jest warunek

$$\bigvee_{1 \leq i \leq n} \bigvee_{1 \leq j \leq m} p_{ij}^k = 0 \quad /7/$$

Prasy, dla których spełniony jest powyższy warunek, występujące kolejno po sobie w linii tworzą wyróżnione podciągi pras w  $k$ -tym stanie istotnym.

Założmy, że dla  $i$ -tej linii czas zajętości pras przedstawiony jest w interpretacji geometrycznej jak na rys. 4.

W  $k$ -tym stanie istotnym tej linii występują dwa wyróżnione podciągi pras. Pierwszy tworzy prasy o numerach 1, 2; drugi - o numerach  $m-1, m$ . Oznaczmy parametry wyróżnionych podciągów pras za pomocą par liczb  $(a_{ix}^k, b_{ix}^k)$ .  $a_{ix}^k$  - numer 1

niezajętej prasy  $x$ -tego wyróżnionego podciągu pras  $i$ -tej linii w  $k$ -tym stanie istotnym;  $b_{ix}^k$  - liczba wolnych pras tworzących ten podciąg.

Analogicznie opisać można wyróżnione podciągi pras w pozostałych liniach. Jeżeli przyjmiemy, że w  $i$ -tej linii jest  $X_1^k$  wyróżnionych podciągów pras, to na całej tłoczni jest ich:

$$X_c^k = \sum_{i=1}^n X_1^k \quad /8/$$

Ze względu na ograniczenia technologiczne dla każdego podciągu pras tylko część detali jest realizowalna i tworzą one podzbiory detali realizowanych  $\Omega_{ix}^k$ . Jeden i ten sam detal może być realizowalny na kilku wyróżnionych podciągach [5].

$$\bigvee_{1 \leq i \leq L} v_1 > 0 \wedge [d_{13} \leq b_{ix}^k \wedge d_{12} = u_{1a_{ix}} / \vee d_{13} < b_{ix}^k \wedge d_{12} = u_{1, a_{ix}+1} /]$$

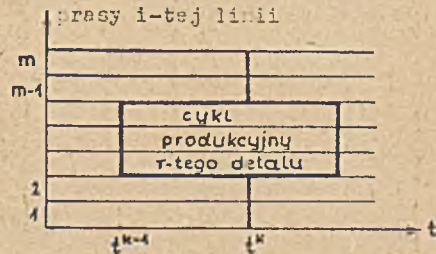
$$\Rightarrow i \in \Omega_{ix}^k \quad /9/$$

Jeżeli istnieje chociaż 1 detal o niezerowym zamówieniu, dla którego tonaż wolnych pras pozwala na jego realizację, to  $x$ -ty wyróżniony podciąg  $i$ -tej linii posiada niepusty zbiór detali realizowalnych.

W przypadku wystąpienia podciągu pras o pustym zbiorze detali realizowalnych należy zmodyfikować macierz zajętości pras wg 1, równań /9/, /10/, /11/.

$$P_z^k = P_z^k + Y^{k+1} \quad /10/$$

$y_{ij}^{k+1}$  - elementy macierzy  $Y^{k+1}$  obliczone z zależności /11/.



Rys.4. Przykładowy  $k$ -ty stan istotny  $i$ -tej linii w interpretacji geometrycznej.

$$y_{1j}^{k+1} = \begin{cases} t_1^{k+1} & \text{jeżeli } \bigwedge_{1 \leq i \leq n} a_{ix}^k \leq \bigwedge_{j \leq i} a_{ix}^k + b_{ix}^k - 1 \text{ jeżeli } \Omega_{ix}^k = \emptyset \\ 0 & \text{jeżeli } p_{1j}^k > 0, \text{ lub podzbiór detali realizowanych dla} \\ & \text{j-tej prasy i-tej linii jest niepusty.} \end{cases} \quad /11/$$

$$t_1^{k+1} = \min_j \{ p_{1j}^k > 0 \}, \quad /j = 1, 2 \dots m/ \quad /12/$$

A zatem dla każdej linii z wyróżnionym podciągiem pras o pustym zbiorze detali realizowalnych uzupełniamy czasy zajętości pras do chwili wystąpienia następnego stanu istotnego, który pozwoli na zmianę parametrów tego podciągu.

Dla każdego wyróżzonego podciągu pras o niepustym zbiorze detali realizowalnych wybierane zostają detale do realizacji. Macierz zajętości pras po wpisaniu tych detali do harmonogramu uzyskujemy z równania /13/.

$$\underline{p}_2^k = \underline{p}^k + \underline{R}^k \quad /13/$$

$\underline{R}^k$  jest macierzą czasów realizacji detali przydzielonych do tłoczenia w k-tym stanie istotnym.

$$r_{1j}^k = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli do j-tej prasy w i-tej linii nie został przydzielony} \\ & \text{żaden detal} \\ t_c/1/ \begin{cases} \bigwedge_{1 \leq i \leq n} a_{ix}^k \leq \bigwedge_{j \leq i} a_{ix}^k + b_{ix}^k - 1 & \text{jeżeli } d_{12} = u_{11} \\ \bigwedge_{1 \leq i \leq n} a_{ix}^k + b_{ix}^k - d_{13} \leq \bigwedge_{j \leq i} a_{ix}^k + b_{ix}^k - 1 & \text{jeżeli } d_{12} \neq u_{11} \end{cases} \end{cases} \quad /14/$$

$t_c/1/$  - całkowity czas produkcji serii l-tego detalu wyznaczony ze wzoru /3/. Takie określenie macierzy realizacji pozwala na zwiększenie liczby pras wyróżnionych podciągu zaczynających się od prasy podwójnego działania w następnych stanach istotnych. Ponieważ produkcja większości wytłoczek rozpoczyna się na prasach podwójnego działania, należy przypuszczać, że prowadzić to będzie do bardziej efektywnych harmonogramów.

Liczbę poszczególnych detali wykonanych do chwili  $t^k$  (wystąpienia k-tego stanu istotnego) określa równanie /15/.

$$\underline{z}^k = \underline{z}^{k-1} + \underline{w}^k \quad /15/$$

$\underline{z}_1^k$  - liczba wyprodukowanych detali l-tego asortymentu;

$$\underline{w}_1 = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli w czasie } /t^{k-1}, t^k/ \text{ l-ty detal nie był produkowany;} \\ \frac{t^k - t^{k-1} - t_p}{d_{14}} & \text{jeżeli l-ty detal był w tym czasie produkowany.} \end{cases}$$

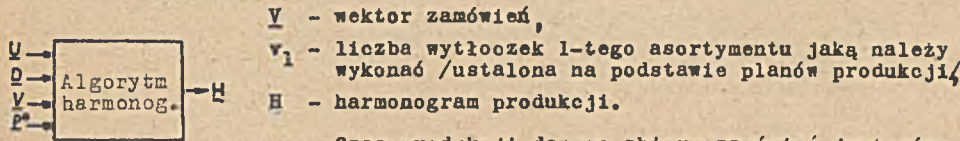
$\underline{w}_1$  - wyraża liczbę detali l-tego asortymentu wyprodukowaną między 2-ma kolejnymi stanami istotnymi. Zmienna  $t_p$  uwzględnia straty czasu na przebrojenie ( $t_p = 0$  jeżeli przebrojenie w tym czasie nie wystąpiło).

Przedstawiony powyżej model obiektu i procesu tłoczenia jest podstawą do opracowanego algorytmu harmonogramowania procesu wytłaczania.

#### 4. Harmonogramowanie procesu wytłaczania.

Harmonogramem nazywać będziemy zbiór informacji określający w każdej chwili z przedziału  $/OT/$ , zwanej okresem harmonogramowania, rozdział zadań produkcyjnych między maszyny. Dla zadanego wektora zamówień  $\underline{V}$  i macierzy warunków początkowych  $\underline{P}_0$  należy ustalić czasy rozpoczęcia i zakończenia produkcji poszczególnych detali oraz przydzielić maszyny, na

których będą wykonywane, w taki sposób, aby zrealizować zbiór zamówień w możliwie najkrótszym czasie.



Rys.5. Blok harmonogramowania: zmiennie  $WE/WY$ .

Czas produkcji danego zbioru zamówień jest równy sumie efektywnego czasu produkcji i czasu przestojów. Czas efektywnej produkcji dla danej wielkości produkcji jest wielkością stałą, a zatem optymalizację harmonogramów można przeprowadzać minimalizując czasy przestojów.

$$Q_s = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta T_{ij}^s \quad /17/$$

$Q_s$  - całkowity czas przestojów maszyn w s-tym wariantcie harmonogramu,  
 $\Delta T_{ij}^s$  - sumaryczny czas przestojów j-tej prasy w i-tej linii w s-tym wariantcie harmonogramu.

Harmonogram optymalny:

$$H^* = \min_{s \in S} \{ Q_s \} \quad /18/$$

S- zbiór dopuszczalnych wariantów harmonogramów.

Ze względu na kombinatoryczny charakter problemu ustalenie wszystkich możliwych harmonogramów przy tej liczbie produkowanych detali jest praktycznie niemożliwe, a zatem do obliczania harmonogramów zastosowano jednokrokową optymalizację wyboru. W każdym stanie istotnym do realizacji wybierane są detale, dla których wskaźnik optymalizacji osiąga maksimum.

$$Q_{ix}^k / 1/ = \frac{d_{13}}{b_{ix}^k} \quad /19/$$

$Q_{ix}^k / 1/$  - wskaźnik dla przydziału 1-tego detalu do x-tego wyróżnionego podciągu i-tej linii.

$d_{13} / b_{ix}^k$  - iloraz liczby pras potrzebnych do produkcji 1-tego detalu i liczby wolnych pras stanowiących x-ty wyróżniony podciąg.

Tak przyjęty wskaźnik pozwala na maksymalizację wydajności tłoczni w danym kroku decyzyjnym. Wybór detalu i linii, na której będzie realizowany, następuje zgodnie z zależnością /20/.

$$\bigwedge_{1 \leq i \leq n} \bigvee_{1 \leq j \leq m} / p_{ij}^k = 0 \wedge 1, x \notin \alpha^k / \quad 1_{1,x}^k = \max_{1,x} \{ \max_{l \in \Omega_{ix}^k} Q_{lx}^k / 1/ \}, \quad l \in \beta^k \quad /20/$$

$\alpha^k$  - zbiór wyróżnionych podciągów w k-tym stanie istotnym, do których już przydzielono detale.

$\beta^k$  - zbiór detali przydzielonych w k-tym stanie do realizacji.

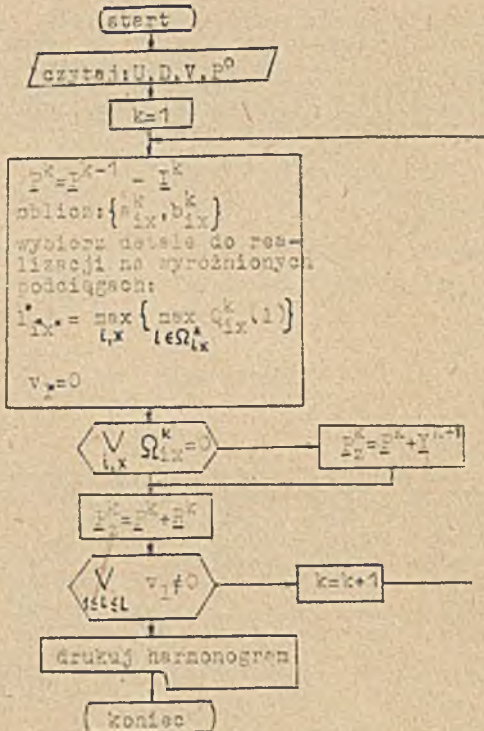
Z wybranych w ten sposób detali budowana jest macierz realizacji zgodnie ze wzorem /14/.

4.1. Heurystyczny algorytm harmonogramowania produkcji.

Algorytm harmonogramowania procesu wytłaczania opracowany został w oparciu o model przedstawiony w rozdziale 3 przy uwzględnieniu następujących założeń:

- 1) współpracujące z Prasownią obiekty nie wnoszą żadnych zakłóceń do realizacji harmonogramów tj:
  - Krajalnia w terminie dostarcza wykreje;

- magazyn tłoczników zabezpiecza terminową dostawę kompletów tłoczników;
  - magazyn wytłoczek pomieści wszystkie spływające z prasowni detale;
- 2) na każdym etapie decyzyjnym przydzielane są do realizacji detale maksymalizujące wyrażenia /19/ i jednorazowo produkowane są całe serie zamówień.
- Schemat blokowy algorytmu przedstawiony jest na rys. 6.



Rys. 6. Schemat blokowy algorytmu harmonogramowania.

Po wczytaniu danych obliczone zostają parametry 1 stanu istotnego. Dla 1 wyróżnionego podciągu pras sprawdzane są wszystkie detale i dla detali realizowalnych obliczony zostaje wskaźnik  $Q_{ix}^k/l_{ix}$ . Wybrany zostaje detal  $i_x$  o najwyższym wskaźniku i następnie ten detal jest na drodze predykcji przydzielany do wszystkich pozostałych wyróżnionych podciągów pras dotąd niezajętych i w ten sposób wybiera się linię, dla której wskaźnik  $Q_{ix}^k/l_{ix}$  jest maksymalny. Do tej linii detal jest przydzielany do realizacji i zerowane jest jego zamówienie. Podobnie poszukiwane są detale do realizacji na wszystkich wyróżnionych podciągach i oblicza się parametry następnego stanu istotnych. W przypadku wystąpienia podciągu o pustym zbiorze detali realizowalnych modyfikuje się jego stan zgodnie z równaniami (10), (11), (12). Cała procedura powtarza się do chwili obliczenia całego harmonogramu, po czym następuje jego wydruk. Program harmonogramowania napisany w języku Fortran, oraz wydruki przykładowych harmonogramów przedstawione są w [1], [5].

### 5. Uwagi końcowe

W referacie przedstawione zostało uproszczone zagadnienie harmonogramowania produkcji tłocznii. W opisanym modelu i algorytmie założono, że magazyn wytłoczek pomieści wszystkie wyprodukowane detale. W rzeczywistości magazyn ten znacznie ogranicza maksymalne długości produkowanych serii detali. W związku z tym zachodzi często potrzeba realizacji zamówień partiami, po wyczerpaniu się zapasu danych detali w magazynie. Również czasy przebrojeń podciągów pras zależą od położenia tłoczników w magazynie względem przetwarzanych linii. Preferować zatem należy na danej linii produkcję tych detali, dla których czas transportu tłoczników jest minimalny. Czynniki te stanowią dodatkowe ograniczenia na zbiory detali realizowalnych.

Jednokrokowa optymalizacja wyboru detali do realizacji nie pozwala wprawdzie na otrzymywanie najlepszych z możliwych do uzyskania harmonogramów, ale czas ich obliczeń jest bardzo krótki.

Ze względu na zakłócenia powstające na prasowni i na obiektach z nią współpracujących realizacja harmonogramów o długich horyzontach planowania jest praktycznie niemożliwa. Zachodzi więc konieczność obliczania

harmonogramów o krótkim horyzoncie, jak również konieczność ponownego układania harmonogramu, w przypadku wystąpienia zakłócenia i zmniejszenia jego dotychczasową strukturę. Dla tych celów niezbędna jest ewidencja w czasie rzeczywistym przebiegu procesu, dla otrzymania zbiorów niezbędnych do harmonogramowania danych. Prace w tym kierunku są prowadzone w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej.

## LITERATURA

- [1] Kowalski H. i inni : Optymalizacja harmonogramowania produkcji Wydziału Tłocznii w Zakładzie nr 2 w Tychach. Gliwice 1977.
- [2] Marecki F. i inni : Optymalizacja struktury procesu wytłaczania. Opracowanie z obozu naukowo-badawczego studentów. Politechnika Śląska, Gliwice 1976.
- [3] Marecki F. : Formalizacja matematyczna procesu wytłaczania blach karoseryjnych. Materiały seminarium na temat "Zastosowanie modelowania cyfrowego", Politechnika Śląska, Gliwice 1976.
- [4] Powlik S. : Symulacja cyfrowa optymalizacji pracy Tłoczni Ciężkiej. Materiały seminarium nt. "Zastosowanie modelowania cyfrowego". Politechnika Śląska, Gliwice 1976, s. 144-154.
- [5] Jurczyk Z. : Projekt struktury urządzeniowej i programowej systemu sterowania Tłocznia Ciężką blach karoseryjnych samochodu kałot-trażowego "Fiat 126", ze szczególnym uwzględnieniem harmonogramowania produkcji, praca dyplomowa Politechnika Śląska, Gliwice 1977.
- [6] Jurczyk Z. Marecki F. : Algorytm optymalizacji struktury procesu wytłaczania Tłoczni Ciężkiej. Zeszyty Naukowe ( w druku).

## КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШТАМПОВАНИЯ ПУЗОВЫХ ЖЕСТЕЙ

## Р е з ю м е

В докладе представлено проблему календарного планирования штампования пузовых жестей. Описан тоже модель штамп пресс об производства пузовых жестей и эвристический алгоритм решения этой задачи.

## THE SCHEDULING OF THE STAMPING PROCESS OF IRON SHEETS FOR CAR-BODIES

## S u m m a r y

In the paper the problem of iron sheets stamping in car-factory is presented. For accepted assumptions the model of stamping factory and stamping process is formulated. Finally an heuristic algorithm of solving the scheduling problem is given.