ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI SLASKIEJ
Seria: AUTOMATYKA z.102 Nr kol.1084

Franciszek Marecki

Politechnika Śląska

RÓWNANIA STANU LINII TECHNOLOGICZNEJ Z ROBOTAMI SUWNICOWYMI *

Streszczenie. W referacie wyprowadzono równania stanu procesu obsługi i transportu obiektów na linii technologicznej z robotami suwnicowymi. Równania te mają postać zależności czasowych i logicznych.

1. Wstęp

Dla sterowania elastycznymi systemami produkcyjnymi potrzebne są odpowiednie modele matematyczne [2], [3]. Spośród różnych koncepcji przedstawiania takich modeli rozwijane jest podejście oparte na równaniach stanu [4],[5], [6]. Podejście to ma znaczenie praktyczne [1], a ponadto daje pewne analogie pomiędzy procesami ciągłymi i dyskretnymi.

W referacie wyprowadzono równania stanu procesu obsługi i transportu obiektów na linii technologicznej z robotami suwnicowymi. Równania te mają postać zależności czasowych i logicznych.

2. Sformułowanie problemu

Załóżmy, że dana jest linia składająca się z agregatów A_1 ..... A_m ..... A_M, pomiędzy którymi nie ma magazynów buforowych. Na linii tej należy obsługiwać obiekty ω_n należące do zbioru Ω. Liczba tych obiektów wynosi N. Marszruta technologiczna każdego obiektu jest taka sama i przechodzi przez kolejne agregaty od A_1 do A_M.

Dana jest macierz czasów obsługi obiektów w agregatach:

$$\Theta = \left[\theta_{m,n} \right] \qquad \begin{matrix} m = 1,\dots,M \\ n = 1,\dots,N \end{matrix} \tag{1}$$

gdzie: $\theta_{m,n}$ - czas obsługi obiektu w m-tym agregacie.

Obiekty są przesuwane pomiędzy agregatami za pomocą robota przemysłowego.

---

* / Praca wchodzi w zakres Programu RP.I.02 w temacie 4.1

Dana jest macierz czasów transportu poziomego:

$$\tau = \left[\tau_{\mu,m} \right] \qquad \begin{matrix} \mu = 0,1,\dots M,M+1 \\ m = 0,1,\dots,M,M+1 \end{matrix} \tag{2}$$

gdzie: $\tau_{\mu,m}$ - czas transportu od μ-tego do m-tego agregatu.

Przyjmiemy, że punkt załadunkowy linii jest oznaczony numerem 0, a punkt wyładunkowy numerem M+1.

Robot w położeniu spoczynkowym znajduje się nad pewnym agregatem w pozycji górnej. Zatem położenie robota jest dyskretne - może się on znajdować w jednym z M+2 punktów. Przeniesienie obiektu z agregatu a_i do agregatu A_j, gdy robot znajduje się nad agregatem A_m, polega na:

- przesunięciu w górnej pozycji z punktu m do i,
- przesunięciu w punkcie i z pozycji górnej do dolnej, a następnie powrót do pozycji górnej,
- przesunięciu w górnej pozycji z punktu i do j,
- przesunięciu w punkcie j z pozycji górnej do dolnej, a następnie powrót do pozycji górnej.

Jak widać, należy rozróżnić ruchy poziome robota (pomiędzy położeniami i oraz j) od ruchów pionowych (pomiędzy pozycjami górną i dolną w danym położeniu). W dalszym ciągu założymy, że dany jest wektor czasów transportu pionowego:

$$\tau^{v} = \left[\tau_{m} \right] \qquad m = 0,1,\dots,M,M+1 \tag{3}$$

gdzie: τ_m - czas przejścia pomiędzy pozycjami w m-tym położeniu (nad agregatem A_m).

Przyjmiemy, że czas przesunięcia robota w górę jest taki sam jak czas przesunięcia robota w dół.

3. Stan systemu

Stan robota w procesie można określić podając jedynie jego położenie. Jeśli robot znajduje się w położeniu m, a podejmowana jest decyzja o wykonaniu zadania "przenieść obiekt z A_i do A_j" - to kolejnym istotnym stanem robota będzie położenie.

Def.1. Stan robota jest skalarem P, gdzie:

$$P \in \langle 0, 1, \dots, M, M+1 \rangle \tag{4}$$

Robot znajduje się w kolejnych stanach w kolejnych istotnych chwilach $t^0 = 0, t^1, \dots, t^k, \dots, t^K$, gdzie : K - liczba wyróżnionych stanów istotnych. Zatem stany robota można oznaczyć jako:

$$\left.\begin{array}{l} P^{o} = P(t^{o}) \\ \dots\dots\dots \\ P^{k} = P(t^{k}) \\ \dots\dots\dots \\ P^{K} = P(t^{K}) \end{array}\right\} \qquad (5)$$

Stan spoczynkowy robota P^{o} jest zawsze dany, a stan końcowy P^{K} może być dowolny lub musi spełniać warunek końcowy procesu, np.

$$P^{K} = 0 \qquad (6a)$$

$$P^{K} = M+1 \qquad (6b)$$

Dla rozpatrywanej linii galwanizerskiej robot może wykonywać różne operacje składające się na zadanie. Dopuszczalne operacje są zależne od stanu robota.

- Jeżeli robot znajduje się w punkcie 0 (wejściowym), to może wykonać zadanie załadunku, tzn. przemieszczenie obiektu z punktu wejściowego do agregatu A_1. Ponadto robot może być przesunięty bez obiektu do pewnego agregatu A_i, jeśli zadanie polega na przemieszczeniu obiektu z A_i do A_{i+1} (lub z A_M do punktu wyjściowego M+1). Przesunięcie robota bez obiektu może także wynikać z konieczności spełnienia warunku końcowego (17).
- Jeżeli robot znajduje się w punkcie $1 \le m \le M$, to może wykonać zadanie przeładunku z A_m do A_{m+1}. Ponadto robot może być przesunięty do punktu wejściowego, by następnie dokonać załadunku lub do punktu wyjściowego (co może wynikać z konieczności spełnienia warunku końcowego).
- Jeżeli robot znajduje się w punkcie wyjściowym, to może być przesunięty do punktu m (by dokonać przeładunku z A_m do A_{m+1} lub z A_M do punktu wyjściowego) lub do punktu wejściowego by dokonać załadunku do A_1.

Zatem aby wykonać zadanie, robot może wykonać wiele operacji. Ogólnie można wyróżnić operacje:

- Załadunku (z wejścia do A_1),
- Wyładunku (z A_M do wyjścia),
- Przeładunku (z A_m do A_{m+1}, $1 \le m$; $m+1 \le M$),
- Transportu (przesunięcie robota bez obiektu pomiędzy dwoma położeniami)
- Oczekiwania (postój w pewnym położeniu).

Sterowanie robotem wymaga rozbicia zadania na operacje. Ponadto należy określić przedział czasu wykonania każdej operacji. Operacja załadunku musi uwzględniać czas 2τ pobrania obiektu. Operacja wyładunku uwzględnia czas $2\tau_{M+1}$ oddania obiektu, a operacja przeładunku musi uwzględniać obydwa te czasy.

W analogiczny sposób należy określić stan linii galwanizerskiej. Stan linii powinien informować o tym, co się dzieje w każdym agregacie w dowolnej chwili.

Def. 2a. Stan agregatu A_m jest wektorem

$$X_m = \left[x_{i,m} \right] \qquad i = 1,2,3,4 \tag{7}$$

Elementy tego wektora określone są następująco:

$$x_{1,m} = \begin{cases} n, \text{ jeśli w agregacie znajduje się obiekt n-tego typu} \\ 0, \text{ jeśli agregat jest pusty} \end{cases} \tag{7a}$$

$$x_{2,m} = \begin{cases} \rho_{m,n}, \text{ jeśli } x_{1,m} = n \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{7b}$$

$$x_{3,m} = \begin{cases} t^1_{m,n}, \text{ jeśli } x_{1,m} = n \\ 0 \quad, \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{7c}$$

$$x_{4,m} = \begin{cases} t^2_{m,n}, \text{ jeśli } x_{1,m} = n \\ 0, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{7d}$$

gdzie: $\rho_{m,n}$ – chwila rozpoczęcia obsługi obiektu n-tego typu w m-tym agregacie,

$t^1_{m,n}$ – chwila zakończenia obsługi obiektu n-tego typu w m-tym agregacie,

$t^2_{m,n}$ – chwila usunięcia obiektu n-tego typu z agregatu A_m.

Zatem zakładamy, że

$$t^1_{m,n} \le t^2_{m,n} \tag{8}$$

W praktyce sterowanie procesem galwanizacji musi być oparte na rejestracji pewnych stanów, zatem można założyć, że w chwili $t^1_{m,n}$ rejestrowany jest sygnał zakończenia operacji obsługi obiektu n-tego typu w agregacie A_m. Od tej chwili robot suwnicowy może rozpocząć ruch pionowy z położenia górnego do położenia dolnego nad agregatem A_m.

Wynika z tego, że nierówność (8) przyjmie postać:

$$t^1_{m,n} + \tau^v_m \le t^2_{m,n} \tag{8a}$$

Robot wykonując pionowe ruchy blokuje dostęp do agregatu A_m przez czas $2\tau^v_m$. Zatem przyjmując interpretację usunięcia obiektu z agregatu jako zwolnienia blokady tego agregatu, należy napisać:

$$t^1_{m,n} + 2 * \tau^v_m \le t^2_{m,n} \tag{8b}$$

Różnica pomiędzy chwilami $t^2_{m,n}$ i $t^1_{m,n}$ może być większa niż $2\tau^v_m$. W takim przypadku założymy, że w chwili $t_{m,n}$ następuje odcięcie dopływu energii do agregatu A_m. Założymy, że obiekt oczekuje w agregacie tak jak w magazynie buforowym.

Def.2b. Stan linii galwanizerskiej jest macierzą:

$$X = \left[x_{i,m} \right] \qquad \begin{matrix} i = 1,2,3,4 \\ m = 1,\dots,M \end{matrix} \tag{9}$$

Jak widać, m-ta kolumna tej macierzy jest stanem m-tego agregatu.

Na podstawie macierzy (9) można określić, co dzieje się w agregatach w dowolnej chwili czasu. Z punktu widzenia przebiegu procesu w agregacie istotne znaczenie mają chwile $\rho_{m,n}$, $t^1_{m,n}$ i $t^2_{m,n}$. W chwili $\rho_{m,n}$ następuje włączenie dopływu energii do agregatu $A_{m,n}$ a w chwili $t^1_{m,n}$ wyłączenie. W przedziale czasu od $\rho_{m,n}$ do $t_{m,n}$ agregat jest zajęty.

Jeżeli przyjmiemy, że czasy $\theta_{m,n}$ są stałe, to

$$t^1_{m,n} = \rho_{m,n} + \theta_{m,n} \tag{10}$$

Zatem w stanie (9) można pominąć kolumnę z chwilami $t^1_{m,n}$.

Można przyjąć, że istotne chwile procesu są określone przez stan robota. Chwila $\rho_{m,n}$ wynika z dostarczenia przez robot obiektu ω_n do agregatu A_m. Przyjmiemy, że agregat A_m rozpoczyna obsługę obiektu ω_n w chwili $\rho_{m,n}$, gdy robot powróci do górnego położenia nad A_m. Analogicznie w chwili zwolnienia agregatu A_m (tzn. $t^2_{m,n}$) robot znajduje się w górnym położeniu nad A_m.

4. Sterowanie

Sterowanie linią galwanizerską (przy stałych czasach $\theta_{m,n}$) polega na sterowaniu robotem suwnicowym. Załóżmy, że w chwili t^{k-1} robot znajduje się nad agregatem A_i w górnym położeniu. Robot ten powinien przenieść obiekt ω_n z agregatu A_m do agregatu A_{m+1}. Aby wykonać to zadanie, robot wykonuje następujące operacje:

- transport poziomy od A_i do A_m,
- przeładunek obiektu ω_n z A_m do A_{m+1}.

Wyróżnienie tych dwóch operacji wynika z faktu, że w przypadku ogólnym jeżeli robot znajduje się nad agregatem A_i, to można podjąć decyzję o transporcie do różnych agregatów. Ponadto w przypadku ogólnym jeżeli robot znajduje się nad agregatem A_m, to można podjąć decyzję o przeładunku obiektu ω_n do alternatywnych agregatów (jeśli mogą wykonać kolejną operację). Należy również dodać, że robot może być przetransportowany od A_i do punktów skrajnych (wejściowego lub wyjściowego).

Reasumując, przyjmiemy, że stan systemu będzie określany w chwilach istotnych, tzn. w chwilach rozpoczęcia i zakończenia przez robot odpowiedniej operacji.

Sterowanie robotem suwnicowym ma określać parametry operacji, którą ma on wykonać. Sterowanie to jest ograniczone stanem systemu, ponieważ:

a) Jeżeli robot znajduje się w punkcie wejściowym (umownie nad agregatem A_0, gdzie pobiera obiekty), to może wykonać następujące operacje:

<u>Oczekiwanie</u> – postój w A_0 do zadanej chwili (czyli kolejnej chwili istotnej).

<u>Załadunek</u> – pobranie pewnego obiektu w A_0 i przeniesienie do A_m. W takim przypadku ulokowanie obiektu ω_n w A_m musi być możliwe bez przerywania operacji. Gdyby operacja załadunku miała być przerwana (bo A_m byłby zajęty), to należy opóźnić rozpoczęcie operacji załadunku. Tym samym w A_0 musi wystąpić operacja <u>Oczekiwanie</u>.

<u>Transport</u> – przesunięcie robota z A_0 do pewnego agregatu A_m bez obiektu. Taka sytuacja może wystąpić w stanie początkowym, gdy robot znajdował się w A_0, natomiast pierwszym zadaniem ma być przeładunek lub wyładunek obiektów.

b) Jeżeli robot znajduje się na linii (w agregatach $A_1, \ldots, A_m, \ldots, A_M$), to może wykonać następujące operacje:

<u>Oczekiwanie</u> – postój w A_m do zadanej chwili "(kolejnej chwili istotnej). Postój może wynikać z oczekiwania na zakończenie procesu w A_m, lub oczekiwanie na zakończenie procesu w A_j do którego robot ma być przetransportowany. Robot bez obiektu może oczekiwać w dowolnym punkcie. Zatem można oczekiwać w A_m tak długo, by po transporcie do A_j bez oczekiwania przystąpić do przeładunku lub załadunku. Można również przetransportować robot z A_m do A_j, a następnie oczekiwać na zakończenie procesu w A_j. Robot z obiektem nie może oczekiwać na zakończenie procesu w A_j. Taka sytuacja nie wystąpi, jeśli w automacie galwanizerskim jest jeden robot, lecz może wystąpić przy dwóch robotach.

<u>Przeładunek</u> – przesunięcie obiektu ω_n z A_m do A_j bez przerwania tej operacji.

<u>Transport</u> – przesunięcie robota z A_m do innego punktu (A_0, A_{M+1} lub A_j dla $j \neq m$) bez obiektu. Przesunięcie do A_0 może być spowodowane chęcią załadunku kolejnego obiektu lub spełnienia warunku końcowego procesu. Również przesunięcie do A_{M+1} może wynikać z konieczności spełnienia warunku końcowego procesu.

<u>Wyładunek</u> - przeniesienie obiektu z A_m do A_{M+1} bez ograniczeń czasowych.

c) Jeżeli robot znajduje się w punkcie wyjściowym, to może wykonać następujące operacje:

<u>Oczekiwanie</u> - postój w A_0 do zadanej chwili istotnej.

<u>Transport</u> - przesunięcie bez obiektu do punktów $A_0, A_1, \dots, A_m, \dots A_M$.

Na podstawie powyższej analizy wnioskujemy, że sterowanie robotem suwnicowym powinno określać następujące informacje:

- typ operacji (oczekiwanie, transport, załadunek, przeładunek lub wyładunek),
- typ przenoszonego obiektu (n=1,...,N, przyjmujemy n=0, jeśli robot nie przenosi obiektu),
- położenie początkowe (m=0,1,...,M,M+1),
- położenie końcowe (m=0,1,...,M,M+1),
- chwila rozpoczęcia operacji,
- chwila zakończenia operacji.

Jest to kompletna informacja o pracy robota. Niektóre elementy wyszczególnione wyżej są zależne (np. czas zakończenia operacji) od innych elementów. Ponadto położenie początkowe robota jest jego stanem. Pomimo tych redundancji można przyjąć następującą definicję sterowania:

<u>Def.3.</u> Sterowanie robotem jest wektorem

$$U = \left[u_i \right] \qquad i = 1,\dots,6 \tag{11}$$

gdzie: u_1 - typ operacji,
u_2 - typ przenoszonego obiektu,
u_3 - położenie początkowe,
u_4 - położenie końcowe,
u_5 - chwila początkowa,
u_6 - chwila końcowa.

Przyjmiemy następujące kody operacji:

0 - <u>Oczekiwanie.</u>
1 - <u>Załadunek.</u>
2 - <u>Wyładunek.</u>
3 - <u>Przeładunek.</u>
4 - <u>Transport.</u>

Stan i sterowanie procesem zmienia się w chwilach istotnych.

3. <u>Analiza</u>

Załóżmy, że stan systemu będzie określany w chwilach istotnych:

$$T^0, T^1, \ldots, T^k, \ldots, T^K$$

gdzie: T^0 – chwila początkowa,
T^K – chwila końcowa.

Przyjmiemy, że

$$T^0 = 0 \tag{12}$$

natomiast chwila T^K na ogół nie jest znana.

Jeżeli celem sterowania procesem galwanizacji jest minimalizacja czasu obsługi danej liczby obiektów, to należy wyznaczyć minimalną chwilę T^K. W przypadku, gdy do linii dopływa nieskończony strumień obiektów, których parametry (chwila pojawienia się oraz typ) nie są znane w chwili T^0, to można analizować sterowanie w zadanym przedziale czasu $[T^0, T]$, gdzie: $T^K \leq$ T. Jako kryterium sterowania przyjmuje się wówczas minimalizację czasu przestoju agregatów.

Przedstawione dwie skrajne sytuacje:

- dany jest zbiór obiektów w chwili T^0,
- do linii dociera nieskończony strumień obiektów, o parametrach nie znanych w chwili T^0

implikują dwa skrajne sposoby sterowania.
Jeśli w chwili T^0 określony jest komplet danych, to można wyznaczy(ć) (teoretycznie) harmonogram procesu - minimalizując T^K. Gdy w chwili T^0 ni(e) ma kompletu danych, to trzeba sterować operatywnie. Sterowanie operatyw(ne) polega na podejmowaniu decyzji w znanym stanie w oparciu o heurystyki, które nie gwarantują optymalności.

Stan agregatów linii galwanizerskiej w kolejnych chwilach istotn(ych) jest ciągiem macierzy

$$X^0, X^1, \ldots, X^k, \ldots, X^K$$

gdzie: X^0 – stan początkowy,
X^K – stan końcowy.

Stan początkowy X^0 jest dany, natomiast stan końcowy X^K powinien jedyni(e) spełniać warunek końcowy procesu. Dla przykładu można przyjąć, że w chwili T^K w agregacie A_m nie może być obiektu. Jeżeli w żadnym agregacie nie moż(e) być obiektu w chwili T^k, to stan końcowy jest zadany.

Stan agregatu X_m w chwili T^k, czyli $X_m(T^k)$ powinien określać, c(o) dzieje się w agregacie A_m w chwili T^k.

Jeżeli

$$x_{1,m} = 0 \tag{13}$$

to pozostałe współrzędne nie mają znaczenia (mogą być zerami). Oznacza to, że w chwili T^k agregat A_m jest pusty.

Jeżeli

$$x_{1,m} = n \tag{14}$$

to oznacza, że agregat A_m nie jest pusty. W chwili T^k zawiera on obiek(t) ω_n. Zatem powinna być określona współrzędna

$$x_{2,m} = \rho_{m,n} \tag{15}$$

Ponadto, jeśli

$$x_{2,m} + \theta_{m,n} \geq T^k \tag{16}$$

to w stanie powinna być określona współrzędna

$$x_{3,m} = t^1_{m,n} \tag{17}$$

Taka zasada wpisywania współrzędnej $x_{3,m}$ daje w perspektywie możliwość uwzględnienia zmiennych czasów $\theta_{m,n}$. Zmiany te mogą zależeć od zasobów (energia) lub być losowe (awarie).

Jeżeli w chwili T^k kończy się operacja, która dotyczyła agregatu A_m, to agregat ten został załadowany lub rozładowany. W przypadku załadunku otrzymujemy warunki (14) i (15), a współrzędne $x_{3,m}$ i $x_{4,m}$ pozostają zerowe. Przypadek wyładunku wymaga pewnej dyskusji. Jeżeli obiekt ω_n ma być przeładowany z A_m do innego agregatu lub punktu wyjściowego, to operacja ta rozpoczyna się ruchem pionowym robota, dalej następuje ruch poziomy i na zakończenie ruch pionowy. Jednakże agregat A_m zostaje zwolniony po pierwszych dwóch ruchach pionowych (w dół a następnie w górę). Zatem otrzymamy:

$$t_{m,n} = T^{k-1} + 2*\tau^v_m \tag{18}$$

Oznacza to, że chwila istotna T^{k-1}, w której robot może rozpocząć operację przeładunku obiektu ω_n w agregacie A_m, jest wcześniejsza od $t^2_{m,n}$. Jednakże w chwili T^{k-1} wiadomo, kiedy agregat A_m zostanie zwolniony. Zatem można przyjąć, że w chwili T^{k-1} (jeśli podjęta jest decyzja o przeładunku z A_m) współrzędne stanu X_m są dodatnie. Równocześnie w chwili T^k (na zakończenie przeładunku) wszystkie współrzędne X_m są zerami, tzn.

$$\left.\begin{aligned} x_{1,m}(T^{k-1}) &= n \\ x_{2,m}(T^{k-1}) &= \rho_{m,n} \\ x_{3,m}(T^{k-1}) &= \rho_{m,n} + \theta_{m,n} \\ x_{4,m}(T^{k-1}) &= T^{k-1} + 2 * \tau^v_m \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

oraz

$$x_{i,m}(T^k) = 0 \tag{20}$$

Ogólnie X_m zawiera informacje o obiekcie ω_n od chwili T^j, kiedy podjęto decyzję o załadunku ω_n do A_m, poprzez wszystkie chwile T^k, gdy obiekt znajdował się w A_m, do chwili T^l, kiedy obiekt ten został usunięty z A_m. Bardziej precyzyjnie można powiedzieć, że jeżeli w chwili T^j podjęto decyzję przeładunku obiektu ω_n do A_m, to agregat ten musiał być pusty, czyli

$$X_m(T^j) = 0 \tag{21}$$

Operacja przeładunku została zakończona w chwili T^{j+1}. Wówczas robot znalazł się nad agregatem A_m w górnym położeniu. Równocześnie można przyjąć, że

$$x_{1,m} (T^{j+1}) = n \tag{22a}$$

oraz $$x_{2,m} (T^{j+1}) = \rho_{m,n} = T^{j+1} \tag{22b}$$

Pozostałe współrzędne są zerowe, tzn.

$$x_{i,m} (T^{j+1}) = 0 \qquad i = 3,4 \tag{22c}$$

stan X_m nie ulega zmianie w chwilach T^{x}, gdzie:

$$T^{j+1} < T^{x} < T^{k} \tag{23}$$

tzn. dla $j+1 < x < k$

$$x_{i,m} (T^{x}) = X_{i,m} (T^{x-1}) \qquad i = 1,\dots,4 \tag{24}$$

zakładamy, że

$$\underset{j+1 \le x < k}{\forall} \quad x_{2,m} (T^{x}) + \theta_{m,n} < T^{x} \tag{25}$$

natomiast w chwili T^{k} spełniony zostanie warunek (18), tzn.

$$x_{2,m} (T^{k}) + \theta_{m,n} \ge T^{k} \tag{26}$$

Wówczas w chwili T^{k} stan X_m ulega modyfikacji do postaci:

$$\left.\begin{aligned} x_{1,m} (T^{k}) &= n \\ x_{2,m} (T^{k}) &= \rho_{m,n} \\ x_{3,m} (T^{k}) &= t^{1}_{m,n} \\ x_{4,m} (T^{k}) &= 0 \end{aligned}\right| \tag{27}$$

Następnie w chwilach T^{x}, gdzie:

$$T^{k} < T^{x} < T^{l} \tag{28}$$

Stan X_m określony przez (27) nie ulega zmianie, tzn.

$$X_m (T^{x}) = X_m (T^{x-1}) \qquad k < x < l \tag{29}$$

W chwili T^{l} podjęto decyzję o przeładunku obiektu ω_n z A_m do innego agregatu lub punktu wyjściowego, zatem zgodnie z (19) otrzymamy:

$$x_{i,m} (T^{l}) = x_{i,m} (T^{l-1}) \qquad i = 1,\dots,3 \tag{30a}$$

oraz $$x_{4,m} (T^{l}) = T^{l} + 2 * \tau^{v}_{m} \tag{30b}$$

Ostatecznie w chwili T^{l+1} agregat A_m będzie pusty, zatem:

$$X_m (T^{l+1}) = 0 \tag{31}$$

Opisany wyżej cykl dotyczy każdego agregatu linii.

8. Równania stanu

Stan robota - czyli jego położenie również ulega zmianie w kolejnych chwilach istotnych, $T^0, T^1, \ldots, T^k, \ldots, T^K$.

Stan początkowy

$$P(T^0) \tag{32}$$

jest dany.

Stan końcowy musi spełniać zadany warunek, np.

$$P(T^K) = (0 \text{ lub } M+1) \tag{33}$$

Jeżeli dany jest stan $P(T^{k-1})$, to stan $P(T^k)$ jest zależny od sterowania $U(T^{k-1})$, ponieważ:

$$P(T^k) = \begin{cases} P(T^{k-1}), \text{ jeśli } u_1(T^{k-1}) = 0 \\ u_4(T^{k-1}), \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{34}$$

Zatem otrzymaliśmy równanie stanu położenia robota suwnicowego w postaci:

$$P(T^k) = f_T\left[T^{k-1}, U(T^{k-1})\right] \tag{35}$$

gdzie: $P(T^0)$ - dany stan początkowy.

W analogiczny sposób można wyznaczyć chwilę T^k na podstawie sterowania $U(T^{k-1})$.

$$T^k = \begin{cases} T^{k-1} + \tau^H_{\mu,m} + 2(\tau^v_\mu + \tau^v_m), \text{ jeśli } 0 < u_1(T^{k-1}) < 4 \\ T^{k-1} + \tau^H_{\mu,m}, \text{ jeśli } u_1(T^{k-1}) = 4, \\ T^{k-1} + \Delta T, \text{ jeśli } u_1(T^{k-1}) = 0. \end{cases} \tag{36}$$

W (36) przyjmujemy, że w chwili T^{k-1} robot znajduje się w punkcie μ, a w chwili T^k ma być w punkcie m. Ponadto ΔT jest zadanym czasem oczekiwania. Tak więc dla operacji oczekiwania u_5 i u_6 w wektorze sterowania są niezależne. Chwila T^k wyznaczona przez (36) jest zapamiętywana w $u_6(T^{k-1})$, tzn.

$$u_6(T^{k-1}) = T^k \tag{37}$$

W ogólnym przypadku mamy:

$$T^k = f_T\left[T^{k-1}, U(T^{k-1})\right] \tag{38}$$

Równania stanu agregatów linii galwanizerskiej można wyprowadzić po dłuższej analizie.

Załóżmy, że dany jest stan $X(T^{k-1})$ oraz stan $P(T^{k-1})$, czyli położenie robota suwnicowego. Należy wyznaczyć stany $X(T^k)$ oraz $P(T^k)$. System jest przeprowadzany do nowych stanów w wyniku dopuszczalnego sterowania $U(T^{k-1})$.

Przeanalizujemy zatem dopuszczalne sterowanie na linii galwanizerskiej bez magazynów buforowych.

Jeżeli na linii nie ma magazynów buforowych, a marszruta każdego obiektu przebiega od wejścia (A_0) poprzez : $A_1, \dots, A_m, \dots, A_M$ do wyjścia (A_{M+1}), to:

- <u>Załadunek</u> może nastąpić, jeżeli A_1 jest pusty, tzn.

$$x_{1,1}(T^{k-1}) = 0 \tag{39}$$

- <u>Wyładunek</u> może nastąpić, jeżeli A_m jest pełny, tzn.

$$\overset{\bullet}{x}_{1,1}(T^{k-1}) > 0 \tag{40}$$

- <u>Przeładunek</u> z A_{m-1} do A_m może nastąpić, jeżeli A_{m-1} jest pełny, a A_m jest pusty, czyli:

$$\left[x_{1,m-1}(T^{k-1}) > 0 \right] \wedge \left[x_{1,m}(T^{k}) = 0 \right] \tag{41}$$

- <u>transport</u> i <u>oczekiwanie</u> mogą nastąpić zawsze.

Ponieważ <u>transport</u> i <u>oczekiwanie</u> są operacjami pomocniczymi, decyzje dotyczą w istocie operacji: <u>załadunku</u>, <u>przeładunku</u> lub <u>wyładunku</u>. Można zatem mówić o dopuszczalnych zadaniach w stanie $X(T^{k-1})$. Realizacja zadania składa się z sekwencji operacji: <u>oczekiwania</u>, <u>transportu</u> oraz <u>załadunku</u> (lub <u>przeładunku</u> lub <u>wyładunku</u>).

Niezależnie od położenia (stanu) robota $P(T^{k-1})$, w stanie linii $X(T^{k-1})$ można wykonać zadanie:

- <u>załadunku</u>, jeśli spełniony jest warunek (39),
- <u>wyładunku</u>, jeśli spełniony jest warunek (40),
- <u>przeładunku</u>, jeśli spełniony jest warunek (41).

W ogólnym przypadku warunki powyższe mogą być spełnione równocześnie. Wówczas należy podjąć decyzję, które zadanie wykonać. Przy wyborze zadania do wykonania kierujemy się przyjętym kryterium optymalizacji. Dla przykładu, może to być minimalizacja czasu obsługi danego zbioru obiektów.

Minimalizacja czasu obsługi polega zatem na maksymalizowaniu przepustowości linii z robotem suwnicowym. W ogólnym przypadku nie można udowodnić, że wykonanie w stanie $X(T^{k-1})$ pewnego zadania jest decyzją optymalną. Dlatego stosowane są heurystyczne reguły decyzyjne. Reguły te powinny być uzasadnione. Rozważmy sposób opracowania pewnej reguły heurystycznej.

Załóżmy, że robot znajduje się w pozycji $P(T^{k-1})$. Ze stanu $X(T^{k-1})$ wynika, że spełnione są równocześnie warunki (39), (40), (41). Które zadanie ma wykonać robot - w pierwszej kolejności?

Przyjmijmy następującą regułę heurystyczną:

" Robot powinien przystąpić do wykonania <u>załadunku</u>. Jeśli <u>załadunek</u> nie jest możliwy - to najpierw <u>przeładunek</u> a potem <u>wyładunek</u>".

Zauważmy, że istnieje 9 różnych heurystyk wynikających z hierarchii zadań:

załadunku, przeładunku i wyładunku. Ponadto można sformułować inne heurystyki, biorąc np. pod uwagę minimalizację czasu transportu robota przed wykonaniem operacji: załadunku, przeładunku lub wyładunku. W ogólnym przypadku heurystyki te można uzasadnić od stanu $X(T^{k-1})$, tzn. wybór heurystyki jest zależny od stanu.

Heurystyka minimalizacji czasu transportu robota będzie w dalszym ciągu traktowana jako wybrana. Przy jednakowych czasach transportu decydować będzie hierarchia zadań.

Zauważmy, że jeśli warunek (41) jest spełniony dla kilku agregatów, to trzeba wybrać jeden z nich, np. najbliższy dla robota.

A) Załóżmy, że stan $X(T^{k-1})$ spełnia warunek

$$\forall_{1 \le m \le M} \quad x_{1,m}(T^{k-1}) > 0 \tag{42}$$

W tym przypadku nie można wykonać załadunku lub przeładunku. Można natomiast wykonać wyładunek.

Załóżmy, że robot znajduje się w stanie

$$P (T^{k-1}) = \mu \neq M \tag{43}$$

Ze stanu $X_M(T^{k-1})$ mamy:

$$\left.\begin{aligned} x_{1,M}(T^{k-1}) &= n \\ x_{2,M}(T^{k-1}) &= \rho_{M,n} \end{aligned}\right\} \tag{44}$$

Jeżeli $$\rho_{M,n} + \theta_{M,n} \le T^{k-1} \tag{45}$$

to $$x_{3,M}(T^{k-1}) = \rho_{M,n} + \theta_{M,n} \tag{46a}$$

Jeśli warunek (52) nie jest spełniony, to

$$x_{3,M}(T^{k-1}) = 0 \tag{46b}$$

Ponadto $$x_{4,M}(T^{k-1}) = 0 \tag{47}$$

Pierwszą operacją, którą wykona robot jest transport z μ do M. Zatem sterowanie $U(T^{k-1})$ ma postać:

$$\left.\begin{aligned} u_1(T^{k-1}) &= 4 \\ u_2(T^{k-1}) &= 0 \\ u_3(T^{k-1}) &= \mu \\ u_4(T^{k-1}) &= M \\ u_5(T^{k-1}) &= T^{k-1} \\ u_6(T^{k-1}) &= T^{k-1} + \tau^{H}_{\mu,M} \end{aligned}\right| \tag{48}$$

Ponadto $$P (T^{k-1}) = M \tag{49}$$

oraz $$T^{k} = T^{k-1} + \tau^{H}_{\mu,M} \tag{50}$$

Stan X w chwili T^k ma postać:

$$\underset{1 \le m \le M}{\forall} \quad \underset{1 \le i \le 2}{\forall} \quad x_{i,m}(T^k) = x_{i,m}(T^{k-1}) \tag{51}$$

oraz

$$x_{3,m}(T^k) = \begin{cases} 0, \text{ jeśli } T^k < x_{2,m}(T^{k-1}) + \theta_{m,n} \\ x_{2,m}(T^{k-1}) + \theta_{m,n}, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{52}$$

Ponadto

$$x_{4,M}(T^k) = \begin{cases} 0, \text{ jeśli } x_{3,M}(T^k) = 0 \\ T^k + 2 * \tau^v_M, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{53}$$

Jeśli $$x_{4,M}(T^k) = 0 \tag{54}$$

to robot musi oczekiwać w punkcie μ. Z (52) i (53) wynika, że robot oczekuje od chwili T^k do chwili T^{k+1}, gdzie:

$$T^{k+1} = x_{2,M}(T^{\ -1}) + \theta_{m,n} \tag{55}$$

Stan X w chwili T^{k+1} ma postać wynikającą z formuł (51), (52) i (53). Zatem

$$\underset{1 \le m \le M}{\forall} \quad \underset{1 \le i \le 2}{\forall} \quad x_{i,m}(T^{k+1}) = x_{i,m}(T^{k-1}) \tag{56}$$

oraz dla m = 1,...,M

$$x_{3,m}(T^{k+1}) = \begin{cases} 0, \text{ jeśli } T^{k+1} < x_{2,m}(T^k) + \theta_{m,n} \\ x_{2,m} + \theta_{m,n}, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{57}$$

Ponadto

$$x_{3,M}(T^{k+1}) = x_{2,M}(T^k) + \theta_{M,n} \tag{58}$$

i $$x_{4,M}(T^{k+1}) = T^{k+1} + 2 * \tau^v_M \tag{59}$$

<u>Sterowanie</u> w stanie $X(T^k)$ <u>dla</u> <u>oczekiwania</u> ma postać

$$\left.\begin{aligned} u_1(T^k) &= 4 \\ u_2(T^k) &= 0 \\ u_3(T^k) &= M \\ u_4(T^k) &= M \\ u_5(T^k) &= T^k \\ u_6(T^k) &= x_{2,M}(T^k) + \theta_{M,n} \end{aligned}\right\} \tag{60}$$

Ponadto $$P(T^k) = M \tag{61}$$

Od stanu $X(T^k)$ lub $X(T^{k+1})$, jeśli robot oczekiwał, rozpoczyna się wyładunek

Oznaczmy chwilę zakończenia wyładunku przez T^{x}, gdzie:

$$T^{x} = \begin{cases} T^{k} + \tau_{M,M+1} + 2(\tau^{V}_{M} + \tau^{V}_{M+1}), \text{ jeśli } T^{k} \geq x_{2,M}(T^{k}) + \theta_{m,n} \\ T^{k+1} + \tau^{H}_{M,M+1} + 2(\tau^{V}_{M} + \tau^{V}_{M+1}), \text{ jeśli } T^{k} < x_{2,M}(T^{k}) + \theta_{m,n} \end{cases} \tag{62}$$

Stan robota

$$P(T^{x}) = M + 1 \tag{63}$$

Stan linii

$$\forall_{1 \leq i \leq 4} \quad x_{i,m}(T^{x}) = 0 \tag{64}$$

oraz

$$\forall_{1 \leq m < M} \quad \forall_{1 \leq i \leq 2} \quad x_{i,m}(T^{x}) = x_{i,m}(T^{x-1}) \tag{65}$$

ponadto

$$\forall_{1 \leq m < M} \quad x_{3,m}(T^{x}) = \begin{cases} 0, \text{ jeśli } T^{x} < x_{2,m}(T^{x-1}) + \theta_{m,n} \\ x_{2,m}(T^{x-1}) + \theta_{m,n}, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{66}$$

i

$$\forall_{1 \leq m < M} \quad x'_{4,m}(T^{x}) = 0 \tag{67}$$

<u>Sterowanie</u> dla operacji <u>wyładunku</u> ma postać:

$$\left.\begin{aligned} u_1(T^{k}) &= 2 \\ u_2(T^{k}) &= n \\ u_3(T^{k}) &= M \\ u_4(T^{k}) &= M + 1 \\ u_5(T^{k}) &= T^{k} \text{ lub } T^{k+1} \\ u_6(T^{k}) &= T^{x} \end{aligned}\right\} \tag{68}$$

Podsumowując analizę przypadku (42) przedstawionego we wzorach: (43) do (68), możemy napisać równanie stanu w postaci:

$$X(T^{k+1}) = f_{L}\left[X(T^{k-1}), P(T^{k-1}), U(T^{k-1}), U(T^{k})\right] \tag{69}$$

Jeśli robot oczekiwał, to równanie (74) należy zmodyfikować

$$X(T^{k+2}) = f_{L}\left[X(T^{k-1}), P(T^{k-1}), U(T^{k-1}), U(T^{k}), U(T^{k+1})\right] \tag{70}$$

Z kolei dla

$$P(T^{k-1}) = M \tag{71}$$

równania (69) lub (70) upraszczają się odpowiednio do postaci:

$$X(T^{k}) = f_L\left[X(T^{k-1}),\ P(T^{k-1}),\ U(T^{k-1}) \right] \tag{72}$$

lub

$$X(T^{k+1}) = f_L\left[X(T^{k-1}),\ P(T^{k-1}),\ U'(T^{k-1}),\ U'(T^{k}), \right] \tag{73}$$

We wzorach (72) i (73) przez U' oznaczono sterowania dla operacji oczekiwania i wyładunku bez uprzedniego transportu.

B) Jeżeli założymy, że stan $X(T^{k-1})$ spełnia warunek:

$$\underset{1 \le m \le M}{\forall} \quad x_{1,m}(T^{k-1}) = 0 \tag{74}$$

to można wykonać tylko <u>załadunek</u>.

Załóżmy, że robot znajduje się w stanie

$$P(T^{k-1}) = \mu = 0 \tag{75}$$

Ze stanu $X(T^{k-1})$ spełniającego warunek (74) mamy

$$\underset{1 \le m \le M}{\forall} \quad \underset{1 \le i \le 4}{\forall} \quad x_{i,m}(T^{k-1}) = 0 \tag{76}$$

<u>Sterowanie dla załadunku</u> $U(T^{k-1})$ ma postać

$$\left.\begin{aligned} u_1(T^{k-1}) &= 1 \\ u_2(T^{k-1}) &= n \\ u_3(T^{k-1}) &= 0 \\ u_4(T^{k-1}) &= 1 \\ u_5(T^{k-1}) &= T^{k-1} \\ u_6(T^{k-1}) &= T^{k-1} + \tau^{H}_{0,1} + 2(\tau^{V}_{0} + \tau^{V}_{1}) \end{aligned}\right\} \tag{77}$$

czyli

$$T^{k} = u_6(T^{k-1}) \tag{78}$$

Stan robota

$$P(T^{k}) = 1 \tag{79}$$

Stan linii

$$\left.\begin{aligned} x_{1,1}(T^{k}) &= n \\ x_{2,1}(T^{k}) &= T^{k} \\ x_{3,1}(T^{k}) &= 0 \\ x_{4,1}(T^{k}) &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{80}$$

Ponadto

$$\underset{1 \le m \le M}{\forall} \quad \underset{1 \le i \le 4}{\forall} \quad x_{i,m}(T^{k}) = 0 \tag{81}$$

Podsumowując analizę przypadku (74), otrzymamy równanie stanu o postaci:

$$X(T^k) = f_L\left[X(T^{k-1}),\ P(T^{k-1}),\ U(T^{k-1}) \right] \tag{82}$$

Jeżeli warunek (75) nie jest spełniony, tzn. robot znajduje się w stanie

$$P(T^{k-1}) = \mu \neq 0 \tag{83}$$

to najpierw musi być przeprowadzona operacja transportu z μ do punktu wejściowego.

Zatem

$$T^k = T^{k-1} + \tau^{H}_{\mu,0} \tag{84}$$

Sterowanie dla transportu ma postać:

$$\left.\begin{aligned} u_1(T^{k-1}) &= 4 \\ u_2(T^{k-1}) &= 0 \\ u_3(T^{k-1}) &= \mu \\ u_4(T^{k-1}) &= 0 \\ u_5(T^{k-1}) &= T^k \\ u_6(T^{k-1}) &= T^k \end{aligned}\right\} \tag{85}$$

Stan robota

$$P(T^k) = 0 \tag{86}$$

Stan linii

$$\underset{1 \le m \le M}{\forall} \quad \underset{1 \le i \le 4}{\forall} \quad x_{i,m}(T^k) = 0 \tag{87}$$

Dalej sterowanie przebiega według algorytmu przedstawionego we wzorach od (75) do (82).

C) Jeżeli założymy, że stan $X(T^{k-1})$ spełnia warunek

$$\underset{1 < m \le M}{\exists} \left[x_{1,1}(T^{k-1}) > 0 \right] \wedge \left[x_{1,m}(T^{k-1}) > 0 \right] \wedge$$
$$\wedge \left[x_{1,m}(T^{k-1}) = 0 \right] \tag{88}$$

to można wykonać tylko przeładunek.

Załóżmy, że

$$P(T^{k-1}) = m - 1 \tag{89}$$

Jeżeli

$$x_{2,m-1}(T^{k-1}) + \theta_{m-1,n} < T^{k-1} \tag{90}$$

to może być wykonana wprost operacja przeładunku.

Sterowanie dla przeładunku ma postać:

$$\left.\begin{aligned} u_1(T^{k-1}) &= 3 \\ u_2(T^{k-1}) &= x_{1,m-1}(T^{k-1}) \\ u_3(T^{k-1}) &= m-1 \\ u_4(T^{k-1}) &= m \\ u_5(T^{k-1}) &= T^{k-1} \\ u_6(T^{k-1}) &= T^k \end{aligned}\right\} \qquad (91)$$

oraz

$$T^k = T^{k-1} + \tau^H_{m-1,m} + 2(\tau^v_{m-1} + \tau^v_m) \qquad (92)$$

Stan robota

$$P(T^k) = m \qquad (93)$$

Stan linii

$$\forall_{1 \le i \le 4} \quad x_{i,m-1}(T^k) = 0 \qquad (94)$$

$$x_{1,m}(T^k) = u_2(T^{k-1}) \qquad (95)$$

$$x_{2,m}(T^k) = T^k \qquad (96)$$

$$\forall_{3 \le i \le 4} \quad x_{i,m}(T^k) = 0 \qquad (97)$$

Ponadto

$$\forall_{\substack{1 \le j \le M \\ j \ne m \\ j \ne m-1}} \quad x_{i,m}(T^k) = x_{i,j}(T^{k-1}) \qquad (98)$$

Jeżeli warunek (90) nie jest spełniony, to robot musi oczekiwać nad agregatem A_{m-1} na zakończenie procesu galwanizacji.

Zatem

$$T^k = x_{2,m-1}(T^{k-1}) + \theta_{m-1,n} \qquad (99)$$

Sterowanie dla oczekiwania ma postać:

$$\left.\begin{aligned} u_1(T^{k-1}) &= 0 \\ u_2(T^{k-1}) &= 0 \\ u_3(T^{k-1}) &= m-1 \\ u_4(T^{k-1}) &= m-1 \\ u_5(T^{k-1}) &= T^{k-1} \\ u_6(T^{k-1}) &= T^k \end{aligned}\right\} \qquad (100)$$

Stan robota

$$P(T^k) = m-1 \qquad (101)$$

Stan linii

$$\forall_{1 \leq m < M} \ \forall_{1 \leq i \leq 2} \quad x_{i,m}(T^k) = x_{i,m}(T^{k-1}) \tag{102}$$

$$x_{3,m}(T^k) = \begin{cases} 0, \text{ jeśli } & x_{2,m}(T^{k-1}) + \theta_{m,n} < T^k \\ x_{2,m}(T^{k-1}) + \theta_{m,n}, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{103}$$

Ponadto

$$\forall_{\substack{1 \leq j \leq M \\ j \neq m-1}} \quad x_{4,m}(T^k) = 0 \tag{104}$$

oraz
$$x_{4,m-1}(T^k) = T^k + 2*\tau^{V}_{m-1} \tag{105}$$

Dalej sterowanie przebiega według algorytmu przedstawionego we wzorach od (89) do (98).

Jeżeli warunek (88) nie jest spełniony, tzn. robot jest w położeniu

$$P (T^{k-1}) = \mu \neq m - 1 \tag{106}$$

to najpierw musi być wykonana operacja transportu robota z A_1 do A_{m-1}. Zatem

$$T^k = T^{k-1} + \tau^{M}_{\mu, m-1} \tag{107}$$

Sterowanie dla transportu ma postać:

$$\left.\begin{aligned} u_1(T^{k-1}) &= 4 \\ u_2(T^{k-1}) &= 0 \\ u_3(T^{k-1}) &= \mu \\ u_4(T^{k-1}) &= m - 1 \\ u_5(T^{k-1}) &= T^{k-1} \\ u_6(T^{k-1}) &= T^k \end{aligned}\right\} \tag{108}$$

Stan robota

$$P (T^k) = m - 1 \tag{109}$$

Stan linii

$$\forall_{1 \leq m \leq M} \ \forall_{1 \leq i \leq 2} \quad x_{i,m}(T^k) = x_{i,m}(T^{k-1}) \tag{110}$$

$$\forall_{1 \leq m \leq M} \quad x_{3,m}(T^k) = \begin{cases} 0, \text{ jeśli } & x_{3,m}(T^{k-1}) + \theta_{m,n} > T^{k-1} \\ x_{3,m}(T^{k-1}) + \theta_{m,n}, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{111}$$

Ponadto

$$x_{4,m-1}(T^k) = \begin{cases} 0, \text{ jeśli } x_{3,m-1}(T^k) = 0 \\ T^{k-1} + 2\tau^{v}_{m-1}, \text{ w przypadku przeciwnym} \end{cases} \tag{112}$$

$$\underset{\substack{1 \le j \le M \\ j \ne m-1}}{\forall} x_{4,m}(T^k) = 0 \tag{113}$$

Dalsza część algorytmu (dla operacji przeładunku oraz ewentualnie dodatkowo operacji oczekiwania) została opisana wyżej.

7. Wniosek

W ogólnym przypadku w równaniach stanu warunki dla: załadunku, wyładunku i przeładunku, mogą być spełnione równocześnie. Wówczas zbiór sterowań dopuszczalnych jest sumą sterowań dopuszczalnych dla przypadków szczególnych.

Na podstawie wyprowadzonych równań stanu został opracowany symulator komputerowy, przedstawiony w [7].

W analogiczny sposób można wyprowadzić równania stanu dla linii z wieloma robotami suwnicowymi. Jednakże dla takiego przypadku należy rozwiązać problem kolizji robotów.

LITERATURA

[1] Cyklis J.:Symulacja elastycznych systemów produkcyjnych z wykorzystaniem macierzy stanu. Zn Pol. Śl..z.85 ss.57, Gliwice 1986.

[2] Flexible Manufacturing Systems. Preceedinds of the International Conference, Stratford. 1986.

[3] Kowalowski i inni: Automatyzacja dyskretnych procesów przemysłowych. WNT, Warszawa 1984.

[4] Marecki F.: Modele matematyczne i algorytmy sterowania alokacji

operacji i zasobów na linii montażowej. ZN Pol. Śl., Automatyka, nr 82, Gliwice 1986.
[5] Marecki F.: Sterowanie operatywne systemem szeregowych magazynów buforowych, ZN Pol. Śl., Automatyka, nr 85, ss. 139 - 155, Gliwice 1986.
[6] Marecki F.: Sterowanie elastycznym systemem produkcyjnym, ZN Pol. Śl., Automatyka, nr 96, ss. 83 - 96, Gliwice 1988.
[7] Żmuda A.: Symulator sterowania linią galwanizerską. Praca dyplomowa magisterska, Instytut Automatyki, Pol. Śl., Gliwice 1990 (nie publikowane).

Recenzent: Doc. dr hab. inż. J. Korbicz

Wpłynęło do Redakcji do 1990-04-30.

STATE EQUATIONS OF A TECHNOLOGICAL LINE WITH A GANTRY ROBOT

Summary

In the paper state equations of objects service and transport at technological line with gantry robot are developed. The equations are time and logical relations.

УРАВЛЕНИЯ СОСТАЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ С ПРОМЫШЛЕННЫМ РОБОТОМ

Резюме

В работе представлено управления процесса обслуживания и транспорта объектоб на технологической линии с промышленным работам. Эти управления являются временными и логическими зависимосьтями.