ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1986
Seria: AUTOMATYKA z. 86 Nr kol. 896

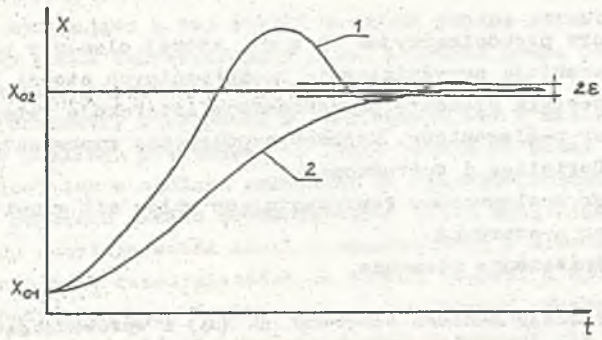
Jolanta Krystek
Politechnika Śląska

BADANIA SYMULACYJNE PRACY POŚLIZGOWEJ ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę różnego rodzaju sterowań robotem przemysłowym dokonaną w oparciu o model matematyczny i symulację cyfrową. Wyniki symulacji posłużyły do zaprojektowania wieloprocesorowego systemu sterowania poślizgowego.

1. Wstęp

Sterowanie robotem przemysłowym polega na osiągnięciu celu sterowania, jakim jest przemieszczenie chwytaka z ustalonego położenia początkowego do ustalonego położenia końcowego wzdłuż zadanej trajektorii. Dokonuje się tego m.in. poprzez pozycjonowanie zespołów ruchu, czyli odpowiednie nastawianie mechanizmów wykonawczych poszczególnych stopni swobody robota. W konwencjonalnych zastosowaniach wymaga się /rys. 1/ aby robot startując z dowolnego położenia początkowego x_{01} osiągnął wymagane położenie końcowe x_{02} i aby różnica między wartością ustaloną $x(t)$ a wartością zadaną x_{0i} nie przekraczała co do wartości bezwzględnej pewnej ustalonej wartości ε zwanej błędem regulacji.



Rys. 1. Regulacja położenia w przypadku pozycjonowania: 1 - z przeregulowaniem, 2 - bez przeregulowania, x_{0i} - położenia zadane, $x(t)$ - zmiany położenia, ε - błąd regulacji

Position regulation in case of positioning: 1 - with overshoot, 2 - without overshoot, x_{0i} - set position, $x(t)$ - position changes, ε - regulation error.

Ze względu na współpracę robota z innymi urządzeniami technologicznymi częstym wymaganiem stawianym robotom jest praca bez przeregulowań.

Sterowaniem, które zapewnia spełnienie tego warunku jest sterowanie poślizgowe.
Wykorzystując w realizacji algorytmu sterowania poślizgowego teorię systemów o zmiennej strukturze można zapewnić oprócz eliminacji przeregulowań - całkowitą lub częściową niezależność od zmian parametrów obiektu oraz odporność na zakłócenia zewnętrzne.

2. Sformułowanie celu sterowania

Dla danych początkowych położenia i prędkości ramion manipulatora : $q_i(t_o)$, $v_i(t_o)$ dla $i=1,\dots n$, gdzie n - liczba stopni swobody, oraz dla zadanych wartości końcowych położenia i prędkości q_z, $v_z \to 0$, należy zaprojektować takie sterowanie $u(q,v)$, które pozwoli na osiągnięcie następujących warunków: $q_i(t) \to q_z$, $v_i(t) \to 0$ lub - używając terminologii teorii sterowania - pozwoli na wyzerowanie uchybu $e_i(t) = q_i(t) - q_z$.

3. Algorytm sterowania

Do analizy sterowania wykorzystano znany model matematyczny [2] opisujący dynamikę manipulatora o n-stopniach swobody, który ma następującą postać:

$$D(q)\ddot{q} = m(q, \dot{q}) + r(q)\, g + u(t) \qquad /1/$$

W równaniu tym:

- $D(q)$ - macierz pseudoinercyjna $n \times m$, której elementy przekątnej reprezentują przyśpieszenia poszczególnych stopni swobody a pozostałe elementy przedstawiają interakcje stopni swobody,
- $m(q,\dot{q})$ - wektor n-elementowy, którego współrzędne reprezentują wpływ sił Coriolisa i dośrodkowych,
- $r(q)$ - wektor n-elementowy reprezentujący wpływ sił grawitacji,
- $u(t)$ - wektor n-sterowań,
- g - przyśpieszenie ziemskie,

Zakładając, że istnieje macierz odwrotna $D^{-1}(q)$ i wprowadzając wektor stanu:

$$x^T = \left[q_1, \dots q_n, \dot{q}_1, \dots \dot{q}_n \right] = \left[q_1, \dots q_n, v_1, \dots v_n \right] \qquad /2/$$

można przedstawić równania dynamiki manipulatora w przestrzeni stanu:

$$\begin{cases} \dot{q}_i = v_i \\ \dot{v}_i = f_i(q, v) + b_i(q)u \end{cases} \qquad i=1,\dots n \qquad /3/$$

gdzie:

$f_i(q,v)$ - i-ty element wektora $D^{-1}(q)\left[m(q,v) + r(q)g\right]$
$b_i(q)$ - i-ty wiersz macierzy $B(q) = D^{-1}(q)$

Wprowadzając pojęcie uchybu regulacji:

$$e(t) = q(t) - q_z(t)$$

Otrzymujemy układ równań stanu manipulatora:

$$\begin{cases} \dot{e}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = f_i(e + q_z, v) + b_i(e + q_z)u \end{cases} \qquad /4/$$

Jest to układ 2n równań różniczkowych pierwszego rzędu, nieliniowych, sprzężonych między sobą.
Do rozwiązania tego problemu można wykorzystać teorię systemów o zmiennej strukturze, które stanowią specjalną klasę nieliniowych układów sterowania. Wyróżniają się one tym, że ich struktura jest celowo zmieniana w trakcie trwania procesu sterowania. Chwile zmian struktury nie są określone przez stały program, ale zależą od aktualnych wartości sygnału błędu i jego pochodnych. Zmiany struktury dokonywane są w różny sposób, np. przez włączenie głównego sprzężenia zwrotnego, lokalnych sprzężeń od pochodnych, kluczowanie sprzężeń zwrotnych.
Sterowania wynikające z tej teorii powodują zmianę struktury systemu w chwili, gdy punkt reprezentujący układ przecina pewną powierzchnię /hiperpowierzchnię/ w przestrzeni fazowej systemu.
Dobierając parametry sterowania w taki sposób, aby w układzie /4/ wystąpiło zjawisko poślizgu powodujemy, że układ będzie poruszał się po linii przełączającej lub w ogólnym przypadku po hiperpowierzchni przełączającej w kierunku początku układu współrzędnych. Układ znajdujący się w idealnym poślizgu oscyluje wokół linii przełączającej z nieskończenie dużą częstotliwością. W rzeczywistości na skutek inercji i opóźnienia w przełączaniu, oscylacje mają ograniczoną częstotliwość. Kształt trajektorii zależy od parametrów linii przełączających natomiast nie zależy od zmian parametrów obiektu, o ile spełnione są warunki wystąpienia poślizgu.
Równania dynamiki manipulatora:

$$D(q)\ddot{q} = m(q, \dot{q}) + r(q)\,g + u \qquad /5/$$

mają bardzo złożoną postać co istotnie utrudnia obliczenia, analizę i interpretację wyników.

Rozpisując te równania w postaci macierzowej mamy:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\ddot{q}_1 \\ \Delta\ddot{q}_2 \\ \Delta\ddot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1(q,\dot{q}) \\ m_2(q,\dot{q}) \\ m_3(q,\dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r_2(q) \\ r_3(q) \end{bmatrix} \varepsilon + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \qquad /6/$$

Dokonując linearyzacji tych równań [1] otrzymujemy równania dynamiki manipulatora - znacznie uproszczone:

$$\begin{bmatrix} d_{11}' & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}' & d_{23}' \\ 0 & d_{32}' & d_{33}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\ddot{q}_1 \\ \Delta\ddot{q}_2 \\ \Delta\ddot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22}'\varepsilon & q_{23}'\varepsilon \\ 0 & q_{32}'\varepsilon & q_{33}'\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \end{bmatrix} \qquad /7/$$

Macierz inercji D dzięki linearyzacji jest macierzą stałych współczynników; dodatkowym efektem jest wyzerowanie macierzy reprezentującej wpływ sił Coridisa i dośrodkowych. Mnożąc lewostronnie układ /7/ przez macierz odwrotną $B = D^{-1}$, otrzymuje się układ równań, z których można wyznaczyć wartości przyśpieszeń poszczególnych stopni swobody. /8/

$$\begin{bmatrix} \Delta\ddot{q}_1 \\ \Delta\ddot{q}_2 \\ \Delta\ddot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & b_{23} \\ 0 & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22}\varepsilon & q_{23}\varepsilon \\ 0 & q_{32}\varepsilon & q_{33}\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11}u_1 \\ b_{22}u_2+b_{32}u_3 \\ b_{32}u_2+b_{33}u_3 \end{bmatrix}$$

W równaniach przyśpieszeń występują elementy reprezentujące sprzężenia między poszczególnymi stopniami swobody. Wystąpienie pracy poślizgowej w jednej osi powoduje pojawienie się w pozostałych osiach składnika o dużej częstotliwości i takiej amplitudzie, że warunek ogólny poślizgu nie byłby spełniony. Uchyb w osi robota, w której pojawił się poślizg jest zregulowany do zera, ale pozostałe osie są destabilizowane.
Wadę tę można wyeliminować poprzez zastosowanie sprzężenia zwrotnego w postaci:

$$u = \left[1 - X \right] w \qquad /9/$$

w którym elementy macierzy sprzężenia zwrotnego X są tak dobrane, aby spełnione było równanie:

$$B \left[1 - X \right] w = \begin{bmatrix} b_{11} w_1 \\ b_{22} w_2 \\ b_{33} w_3 \end{bmatrix} \qquad /10/$$

Równanie dynamiki modelowanego manipulatora, po uwzględnieniu sprzężenia zwrotnego /9/, można przedstawić w przestrzeni stanów, jako układ równań

o następującej postaci:

$$\begin{cases} \dot{q}_i = v_i \\ \dot{v}_i = b_i G q + b_i \left[1 - X \right] w \end{cases} \qquad i=1,\dots n \qquad /11/$$

gdzie:

b_i - wiersze macierzy B dla układu zlinearyzowanego
G - macierz stałych współczynników

Równania linii przełączających są następujące:

$$s_i = v_i + c_i q_i \qquad i=1,2,3 \qquad /12/$$

Po zróżniczkowaniu /12/ otrzymuje się

$$\dot{s}_i = \dot{v}_i + c_i \dot{q}_i \qquad /13/$$

Uwzględniając równania /11/ - /13/ ogólny warunek wystąpienia poślizgu $s\dot{s} < 0$, można przedstawić w następujący sposób:

$$(v + C q)\left(B G q + B \left[1 - X \right] w + C v\right) > 0 \qquad /14/$$

Wystąpienie pracy poślizgowej w układzie możliwe jest w dwóch przypadkach:

1. gdy $s > 0$, i $\dot{s} < 0$, czyli:

$$BGq + B \left[1 - X \right] w + Cv < 0 \qquad /15/$$

2. gdy $s < 0$ i $\dot{s} > 0$, czyli:

$$BGq + B \left[1 - X \right] w + Cv > 0 \qquad /16/$$

Mnożąc lewostronnie nierówności /15/ i /16/ przez macierz D, która dla zlinearyzowanego układu równań jest macierzą stałych współczynników, otrzymujemy

$$\left[1 - X \right] w^{+} < - DCv - Gq \qquad /17/$$

$$\left[1 - X \right] w^{-} > - DCv - Gq \qquad /18/$$

czyli

$$w^{+} < - \left[1 - X \right]^{-1} \left[DCv + Gq \right] \qquad /19/$$

$$w^{-} > - \left[1 - X \right]^{-1} \left[DCv + Gq \right] \qquad /20/$$

Układ nierówności /20/ pozwala na wyznaczenie granicznych wartości sterowania w_{eq}, dla którego spełniony jest warunek pracy poślizgowej układu: $s\dot{s} < 0$.

4. Analiza sterowań

Celem symulacji była analiza możliwości wykorzystania do sterowania robotem impulsowych sygnałów sterujących o ogólnej postaci:

$$u_i(q,v) = \begin{cases} u^+(q,v) & \text{jeżeli} \quad s_i(e,v) \geqslant 0 \\ u^-(q,v) & \text{jeżeli} \quad s_i(e,v) < 0 \end{cases} \qquad /21/$$

gdzie: $s_i(e,v)$ - są równaniami hiperpowierzchni przełączających a parametry wektora sterowania u są tak dobrane, aby spełniony był ogólny warunek wystąpienia poślizgu.

Analizowane sterowanie impulsowe spełnia następujące warunki:

- zapewnia możliwość realizacji trajektorii metodą PTP /metoda sterowania punktowego/,
- gwarantuje stabilną pracę układu manipulacyjnego i zabezpiecza przed przeregulowaniem,
- pomimo tego, że sygnał sterujący jest nieciągły i jego znak zmieniany jest z dużą częstotliwością, to otrzymuje się gładką trajektorię ruchu przegubów robota co wskazuje na to, że mechanizm układu manipulatora działa jak filtr eliminujący składową o wysokiej częstotliwości wygenerowaną przez elementy przełączające.

Wybór tej klasy sterowań spowodowany jest łatwością realizacji w układach cyfrowych. Dodatkowo, układy cyfrowe są znacznie bardziej odporne na szumy i zakłócenia niż układy analogowe. W tej klasie sterowań impulsowych można wyróżnić: sterowanie z modulacją amplitudy pierwszego oraz drugiego rodzaju i sterowanie z modulacją wypełnienia impulsu sterującego /rys. 2/ Każde z wymienionych sterowań może zostać zastosowane w rzeczywistym układzie sterowania robotem. Dzięki wprowadzeniu sprzężenia zwrotnego zdefiniowanego przez równanie /9/ otrzymujemy układ prawie odsprzężony i to pozwala na zastosowanie dla każdego sterowania impulsowego najprostszego równania definiującego sterowanie i równania linii przełączających.

W trakcie symulacji badano sterowanie analogowe oraz sterowanie impulsowe z modulacją amplitudy i sterowanie z modulacją wypełnienia impulsu sterującego. Sterowanie zdefiniowano następująco:

a/ dla układu ciągłego:

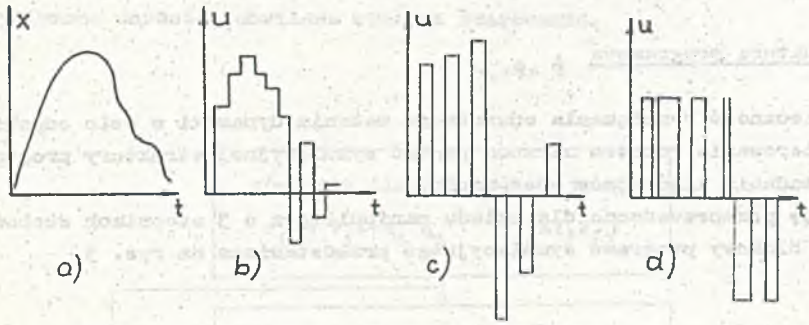
$$w_i(t) = -k_i \operatorname{sign}(s_i \dot{s}_i) \left\{ \left| w_{ieq} \right| + e_i \right\} \qquad i=1,2,3 \qquad /22/$$

gdzie: k_i są współczynnikami wzmocnienia a w_{ieq} są granicznymi wartościami sterowania, przy których spełniony jest warunek $s_i \dot{s}_i < 0$ $i = 1,2,3$.

b/ dla układu z impulsową modulacją amplitudy I rodzaju:

$$w_i(t) = -k_i \operatorname{sign}\left(s(t_\nu)\ \dot{s}(t_\nu)\right) \left\{ \left| w_{ieq} \right| + e_i(t) \right\} \qquad i=1,2,3 \quad \nu=1,2,\ldots \qquad /23/$$

gdzie t_ν - kolejne chwile próbkowań sygnału uchybu.



Rys. 2. Sygnał uchybu $x(t)$ oraz odpowiadające mu przebiegi impulsowych sygnałów sterujących: a/sygnał uchybu, b/ modulacja amplitudy pierwszego rodzaju, c/ modulacja amplitudy drugiego rodzaju, d/ modulacja szerokości impulsu.

Error signal $x(t)$ and corresponding pulse control signals.

W tym sterowaniu amplituda i znak sygnału sterującego mogą zmieniać się tylko w chwili próbkowania sygnału uchybu, natomiast wewnątrz przedziału próbkowania sygnał sterujący nie może się zmieniać.

c/ dla układu z modulacją amplitudy II rodzaju, sygnał sterujący w każdym przedziale próbkowania składa się z impulsu o stałej amplitudzie trwający $\lambda\tau$ oraz przerwy długości $(1-\lambda)\tau$, gdzie $0 < \lambda < 1$

$$w_1(t) = \begin{cases} -k_1 \operatorname{sign}\left(s(t_\nu)\ \dot{s}(t_\nu)\right) \left\{ \left| w_{1eq}(t_\nu) \right| + \left| e_1(t_\nu) \right| \right\}_{t_\nu} & \text{jeżeli } t_\nu \leqslant t < t_\nu + \lambda \\ 0 & \text{jeżeli } t_\nu + \lambda \leqslant t < t_{\nu+1} \end{cases} \qquad /24/$$

gdzie $t_{\nu+1} = t_\nu + \tau$, a τ jest okresem próbkowania.

d/ dla układu z modulacją wypełnienia impulsu sterującego, sygnał sterujący składa się z ciągu impulsów o stałej amplitudzie A w każdym przedziale próbkowania i zmiennej szerokości .

$$w_1(t) = \begin{cases} -A \operatorname{sign}\left(s(t_\nu)\ \dot{s}(t_\nu)\right) & \text{dla } t_\nu \leqslant t < t + \Theta \\ 0 & \text{dla } t_\nu + \Theta \leqslant t < t_{\nu+1} \end{cases} \qquad /25/$$

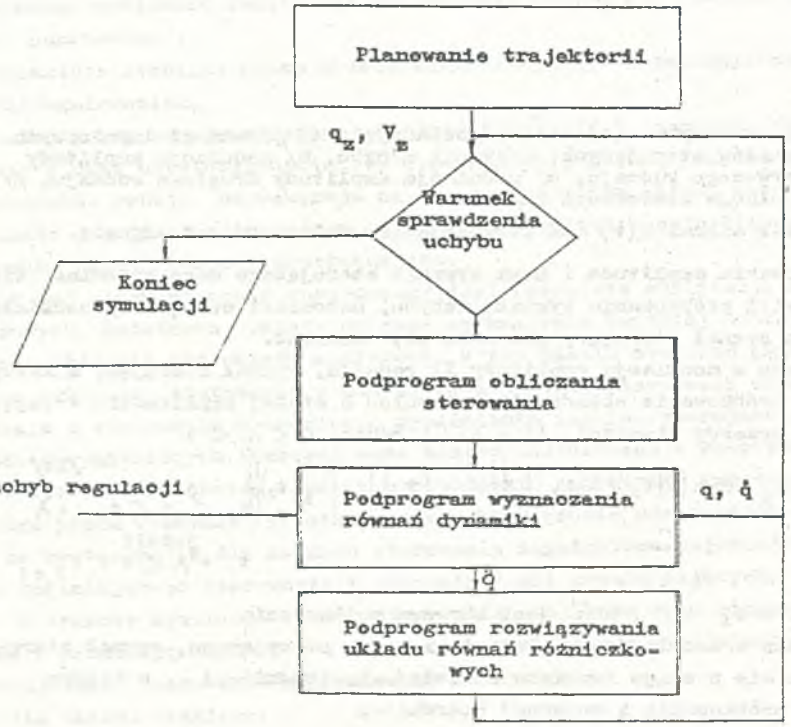
gdzie Θ jest liniową funkcją z nasyceniem postaci:

$$\Theta = \begin{cases} \tau k_1 \left| e_1(t_\nu) \right| & \text{dla } k_1 \left| e_1(t_\nu) \right| \leqslant 1 \\ \tau & \text{dla } k_1 \left| e_1(t_\nu) \right| > 1 \end{cases} \qquad /26/$$

Wartości λ oraz τ są tak dobrane aby spełnione były warunki zapewniające asymptotyczną stabilność układu.

5. Struktura programowa

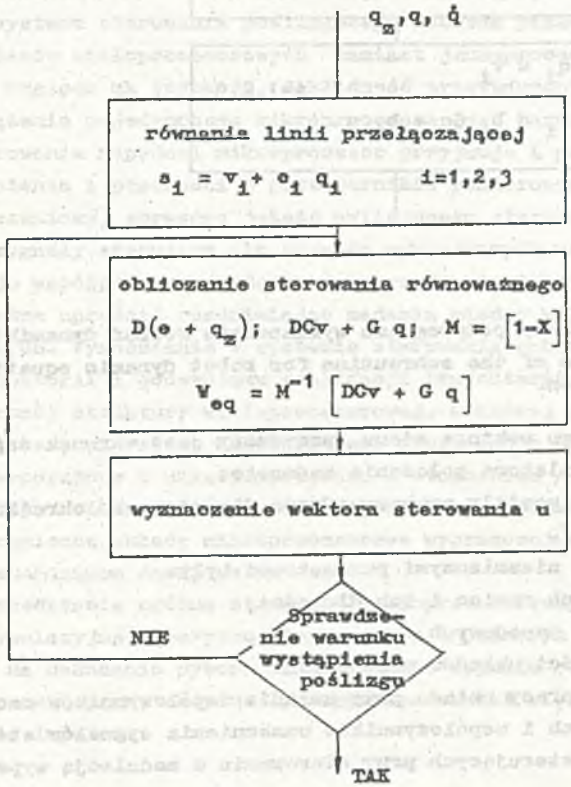
Konieczność rozwiązania odwrotnego zadania dynamiki w celu odpowiedniego sterowania robotem narzuca postać symulacyjnej struktury programowej do badania algorytmów sterowania.
Symulację przeprowadzono dla układu manipulatora o 3 stopniach swobody. Schemat blokowy programu symulacyjnego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy programu symulacyjnego
Blockdiagram of the simulation program

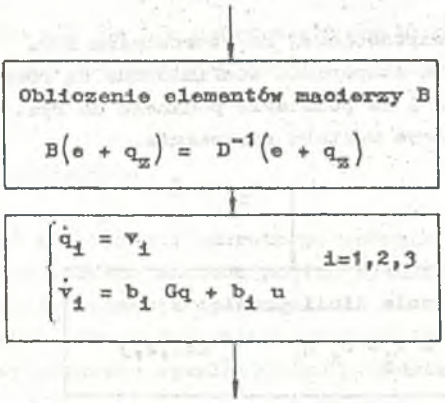
Blok planowania trajektorii wyznacza wartości początkowe i końcowe położenia i prędkości, czyli wektor stanu. Na tym etapie badań założono znajomość trajektorii i dlatego problem regulacji sprowadza się do rozwiązania

zadania regulacji stałowartościowej ze sterowaniem PTP.
W podprogramie obliczania sterowania zdefiniowane są równania hiperpowierzchni przełączającej i na podstawie podanego na rys. 4 algorytmu, wyliczono wartości chwilowe wektora sterowania.



Rys. 4. Schemat blokowy podprogramu obliczania sterowania
Blockdiagram of the control calcutation subroutine

Kolejnym etapem jest wyznaczenie równań dynamiki robota zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 5.
Po wyznaczeniu wektora sterowania, znając wartości macierzy inercyjnej D oraz elementy wektora wpływu sił Coriolisa, sił dośrodkowych i grawitacji wylicza się elementy macierzy odwrotnej B, a następnie wartości prędkości i przyśpieszeń.
W celu uzyskania wartości położenia i prędkości poszczególnych stopni swobody należy numerycznie rozwiązać układ równań różniczkowych /11/. Wartości te są niezbędne do wyznaczenia kolejnych wartości sterowania w chwili $t + \Delta t$.



Rys. 5. Schemat blokowy podprogramu wyznaczania równań dynamiki robota
Blockdiagram of the subroutine for robot dynamic equations determination.

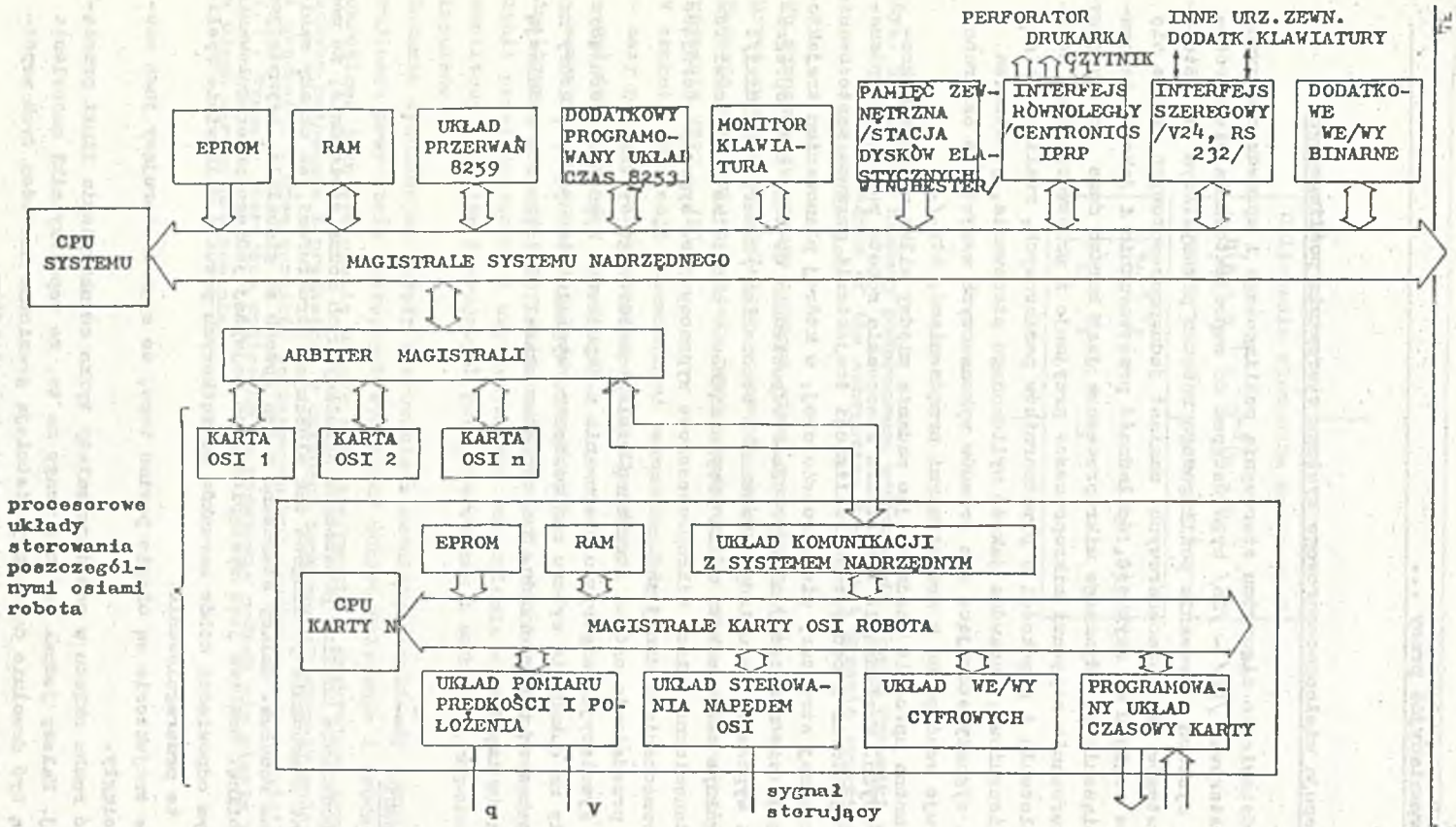
Po wyznaczeniu nowego wektora stanu sprawdzany jest warunek osiągnięcia przez ramiona manipulatora położenia zadanego.
Badania symulacyjne zostały przeprowadzone dla sterowań określonych przez równania /22/ - /26/.
W trakcie symulacji niezmiennymi parametrami były:
- masy poszczególnych ramion i ich długości,
- położenie układów napędowych,
- momenty bezwładności układów napędowych.
Analizowano jakość pracy układu przy zmianie współczynników nachylenia linii przełączających i współczynników wzmocnienia sygnałów sterujących, amplitudy sygnałów sterujących przy sterowaniu z modulacją wypełnienia impulsów.
Badania symulacyjne objęły sterowanie z modulacją amplitudy sygnału sterującego przy stale dostępnych sygnałach uchybu położenia i prędkości, określone jako sterowanie ciągłe oraz sterowanie z dyskretnym sygnałem uchybu położenia i prędkości. W układach impulsowych sygnały położenia i prędkości z przetworników pomiarowych były próbkowane z częstotliwością $1/T$. Sygnały sterujące wyliczane na podstawie próbek nie uległy zmianie w ciągu okresu próbkowania.

6. Koncepcja wieloprocesorowego systemu sterowania poślizgowego

Przedstawienie algorytmu sterowania poślizgowego i sprawdzenie symulacyjne sterowań /22/ - /26/ było wstępem do zaprojektowania wieloprocesorowego systemu sterowania poślizgowego robotem przemysłowym [1]. Stosowanie systemów wieloprocesorowych zamiast jednoprocesorowych wydaje się celowe ze względu na szybkość, dokładność przetwarzania i jakość sterowania. Obciążenie pojedynczego mikroprocesora jest bardzo duże /np. w przypadku sterowania napędami mikroprocesor przyjmuje i przetwarza dane wejściowe położenia i prędkości z przetworników pomiarowych, realizuje algorytm obliczeniowy, sprawdza jakość wyliczonego sterowania, przetwarza i wysyła sygnały sterujące dla organów wykonawczych wszystkich osi robota, steruje współpracą z zewnętrznymi urządzeniami, itp./.
Problem można uprościć rozdzielając zadania między kilka układów mikroprocesorowych. Wyróżnienie w systemie sterowania robota podsystemu planowania trajektorii i podsystemu realizacji trajektorii narzuca zastosowanie hierarchicznej struktury wieloprocesorowej, w której planowaniem trajektorii zajmuje się nadrzędny mikroprocesor odpowiednio do tego celu oprogramowany i wyposażony w układy sprzężone z otoczeniem /kamery, czujniki/. Poszczególnym osiom robota można przyporządkować oddzielne karty zawierające autonomiczne układy mikroprocesorowe wypracowujące sygnały sterujące dla serwomechanizmu danej osi.
Rys. 6. przedstawia ogólną strukturę wieloprocesorowego systemu.
Badania symulacyjne algorytmu sterowania z impulsowym sygnałem sterującym pozwoliły na dokonanie wyboru najprostszego sygnału sterującego, który zapewnia poprawną pracę układu. Tym sygnałem okazał się sygnał z modulacją wypełnienia impulsu.

7. Wnioski

Na podstawie analizy przebiegów symulacyjnych można stwierdzić, że możliwe jest sterowanie poślizgowe tak złożonymi strukturami, jak układy manipulacyjne robotów. Układy sterowane w ten sposób są globalnie, asymptotycznie stabilne. Możliwe jest wystąpienie co najwyżej jednego przeregulowania, przy czym odpowiedni dobór warunków początkowych pozwala całkowicie wyeliminować te przeregulowania.
Uzyskane trajektorie są ciągłe pomimo tego, że sygnał sterujący jest zawsze nieciągły.
Szybkość ruchu układu w poślizgu zależy tylko od nachylenia linii przełączającej. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że współczynniki nachylenia nie mogą być dowolnie duże, gdyż istnieją graniczne wartości tych współczynników, dla których układ przestaje być stabilny.



Rys. 6. Ogólna struktura wieloprocesorowego systemu sterowania poślizgowego robotem przemysłowym - system nadrzędny i karta jednej osi.

General structure of the multiprocessor sliding mode control system of robot - master system and axis chard.

Zmiana współczynników wzmocnienia sygnałów sterujących nie wpływa w sposób istotny na prędkość ruchu poślizgowego, natomiast zasadniczo wpływa na odcinek trajektorii przed osiągnięciem linii przełączającej.
Impulsowy charakter sygnału sterującego powoduje, że uzyskiwane są trajektorie quasipoślizgowe. Może to być powodem wystąpienia cyklu granicznego pod koniec stanu nieustalonego. Można się zabezpieczyć przed taką możliwością stosując maksymalną częstość próbkowania sygnałów położenia i prędkości.
Zastosowanie impulsowego sygnału sterującego z modulacją wypełnienia impulsu znacznie upraszcza strukturę wieloprocesorowego systemu sterowania robotem a wprowadzenie sprzężenia zwrotnego odsprzęgającego poszczególne osie pozwala stworzyć strukturę modułową sterownika.

LITERATURA

[1] Stasiuk J.: Wieloprocesorowy system sterowania poślizgowego napędami robota przemysłowego - algorytm i oprogramowanie karty systemu. Praca dyplomowa /niepublikowana/, Politechnika Śląska, Gliwice 1985.

[2] Staszulonek A.: Projektowanie i badania symulacyjne sterowania robotów przemysłowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1985.

[3] Young K.K.D.: Controller Design for Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-8, February 1978.

Recenzent: Doc.dr h.inż.Stanisław Kaczanowski
Wpłynęło do Redakcji do 1986.04.30

СИМУЛЯЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕЙ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Р е з ю м е

В работе дан анализ различного вида управлений промышленными роботами на основе математической модели и цифровой симуляции. Результаты симуляций были использованы для проектирования многопроцессорной системы скользящего управления.

SIMULATION CAPABILITIES /RESEARCH/ SLIDING MODE CONTROL OF ROBOT

S u m m a r y

This paper presents robot control analysis. Basing on the differential equestions of three-joint manipulator, the computer simulation of sliding work has been carried on. The results of simulation were used to design the multiprocessor system of sliding mode control of the robot motion. The paper describes the general structure of the system.