

Jerzy Józefczyk

Politechnika Wrocławska

WYBRANE PROBLEMY MIKROKOMPUTEROWEGO STEROWANIA RUCHEM MANIPULATORA
ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO
SELECTED PROBLEMS OF THE MICROCOMPUTER CONTROL OF AN INDUSTRIAL ROBOT
MANIPULATOR

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МИКРОКОМПЬЮТЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
МАНИПУЛЯТОРА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Streszczenie: W pracy scharakteryzowano problematykę sterowania ruchem manipulatorów robotów przemysłowych, sformułowano dwa problemy sterowania ruchem manipulatora robota IRb-6 oraz zaprezentowano wybrany algorytm sterowania i przykład obliczeniowy.

Summary: The problems of control of the industrial robot manipulators have been characterized, two of them for the manipulator of the robot IRb-6 have been formulated and the selected control algorithm with the example of calculations have been presented.

Резюме: В статье предложена характеристика проблем управления движением манипуляторов промышленных роботов. Сформулированы две проблемы управления для манипулятора робота IRb-6 и представлен алгоритм управления вместе с вычислительным примером.

1. Wstęp

Wzrost możliwości praktycznego zastosowania manipulatorów i robotów przemysłowych oraz intensywny rozwój technik komputerowych sprawiają, że rozwijana od wielu lat problematyka sterowania takimi obiektami jest ciągle aktualna. Rozważanych jest wiele aspektów tej problematyki, w których uwzględnia się różne metody modelowania i strategie sterowania oraz występuje się różne środki techniczne do realizacji wyznaczonych algorytmów sterowania. Prezentowana praca mieści się w tym kręgu tematycznym. Scharakteryzowano w niej problematykę sterowania ruchem manipulatorów robotów przemysłowych oraz zestawiono wybrane wyniki uzyskane w tym zakresie w ostatnich kilku latach w Zespole Systemów Sterowania Instytutu Sterowania i Techniki Systemów Politechniki Wrocławskiej.

Problematykę sterowania ruchem manipulatora robota przemysłowego rozpatrywano przyjmując następujące założenia:

a. Manipulator robota przemysłowego jest obiektem sterowania istotnie nieliniowym i istotnie wielowymiarowym, co oznacza, że nieliniowości oraz wielowymiarowości rozpatrywanego obiektu nie można pominąć w procesie modelowania i sterowania.

b. Urządzeniem sterującym jest mikrokomputer, tak więc opracowywane algorytmy sterowania są dyskretne.

Rozważania ograniczono do symulacji - opracowanych algorytmów sterowania nie implementowano na realnym obiekcie. Przyjęto również, że sterowanie jest realizowane w układzie zamkniętym z wykorzystaniem informacji o bieżącym położeniu oraz prędkościach poszczególnych osi manipulatora. Za-

łożono, że obiektem sterowania jest manipulator wraz z elementami napędowymi.

W rozdziale 2 scharakteryzowano problematykę sterowania ruchem manipulatorów. Rozdział 3 prezentuje wybrane koncepcje sterowania dla robota IRb-6. W rozdziale 4 przedstawiono przykład obliczeniowy dla wybranego przypadku sterowania ruchem manipulatora robota IRb-6.

2. Problematyka sterowania ruchem manipulatora

Przedmiotem dalszych rozważań jest obiekt, czyli manipulator robota przemysłowego, opisany ogólnie za pomocą wektora stanu;

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)], \quad (1)$$

gdzie: $\mathbf{x}(t)$ - stan obiektu, $\mathbf{u}(t) = [u^{(1)}(t), u^{(2)}(t), \dots, u^{(B)}(t)]^T$ - wektor wielkości sterujących. Stan $\mathbf{x}(t)$ jest określany jako:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}(t) \\ \dot{\mathbf{y}}(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdzie $\mathbf{y}(t) = [y^{(1)}(t), y^{(2)}(t), \dots, y^{(l)}(t)]^T$ - wektor wielkości wyjściowych, którego elementami są współrzędne określające położenie wybranej konfiguracji punktów obiektu, przy czym wybór rodzaju współrzędnych dokonywany jest tak, aby otrzymać możliwie najprostszą postać funkcji \mathbf{f} i zdeterminowany jest zwykle określonymi możliwościami ruchów poszczególnych części obiektu.

W dalszym ciągu obowiązywać będą założenia, że położenie będzie określane w tzw. współrzędnych wewnętrznych manipulatora odniesionych do chwytaka traktowanego jako punkt materialny oraz że zależności pomiędzy $\mathbf{y}(t)$ a $\mathbf{u}(t)$ będą wyznaczane w oparciu o formalizm równania Lagrange'a.

Dla tak scharakteryzowanego obiektu sterowania można różnie sformułować problem sterowania, precyzując cel sterowania i ograniczenia. Ze względu na cel sterowania wymienimy dwa podstawowe przypadki.

I. Zadane jest położenie, tj. punkt \mathbf{y}^* , do którego obiekt ma dojść i w którym ma się zatrzymać, tzn. $\dot{\mathbf{y}}^* = \bar{\mathbf{0}}$ (wektor zerowy) - w przypadku idealnym (sterowanie docelowe). Innymi słowy zadany jest punkt w przestrzeni stanu \mathbf{x}^* . Jeśli jest to punkt osiągalny, to można sformułować problem sterowania optymalnego polegający na wyznaczeniu $\mathbf{u}(t)$ takiego, by osiągnąć \mathbf{x}^* w najkrótszym czasie przy ewentualnych dodatkowych ograniczeniach. Jeśli ideał \mathbf{x}^* nie jest osiągalny, można wprowadzać ocenę jakości w postaci funkcji $\varphi[\mathbf{x}(T), \mathbf{x}^*]$, najczęściej oznaczającej odległość $\mathbf{x}(T)$ od \mathbf{x}^* , gdzie T jest czasem sterowania. Zwykle $\dot{\mathbf{y}}(T) = \bar{\mathbf{0}}$ i oceniamy odległość $\mathbf{y}(T)$ od \mathbf{y}^* . Sterowanie optymalne polega na minimalizacji wartości φ . W obu przypadkach można również osłabić wymagania i wyznaczać sterowanie zadowalające, tzn. takie, że czas sterowania jest mniejszy od określonej liczby lub wartość φ jest mniejsza od określonej liczby, tzn. sterowanie doprowadza do położenia $\mathbf{y}(T)$ w zadanym otoczeniu \mathbf{y}^* . Można wreszcie uwz-

ględniac oba wskaźniki jakości, wyznaczając np. sterowanie doprowadzające w najkrótszym czasie do określonego otoczenia y^* .

II. Cel sterowania określony jest przez idealną trajektorię $y^*(t)$ dla $t \in [0, T]$, a w przypadku wymagań również na zmianę prędkości $\dot{y}^*(t)$ - przez idealną trajektorię $x^*(t)$. Wówczas dla oceny sterowania wprowadzamy funkcjonal, którego wartość ocenia funkcję $x(t)$ w odniesieniu do funkcji $x^*(t)$, np. w postaci całkowej

$$Q = \int_0^T \varphi[x(t), x^*(t)] dt. \quad (3)$$

Sterowanie optymalne minimalizuje ten funkcjonal, sterowanie zadowalające daje Q mniejsze od zadanej liczby. Rozróżniamy tu dwie sytuacje:

- $y^*(t)$ jest a priori znana projektantowi systemu sterowania,
- $y^*(t)$ nie jest z góry znana, ale w trakcie sterowania wartość $y^*(t)$ może być na bieżąco mierzona i wprowadzana do algorytmu sterowania. Wartości $y^*(t)$ mogą zmieniać się w sposób losowy (są realizacjami procesów stochastycznych) i/lub mogą być mierzone z losowymi zakłóceniami.

Ze względu na występujące ograniczenia wymienimy następujące przypadki:

I. Ograniczenie dla $u(t)$ w czasie sterowania, np.:

$$\begin{aligned} \bigwedge_{t \in [0, T]} \bigwedge_{i \in \overline{1, s}} |u^{(i)}(t)| < M_2, \\ \bigwedge_{t \in [0, T]} u^T(t)u(t) < M_1, \quad \int_0^T u^T(t)u(t)dt < M_3, \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie $M_{1,2,3}$ są zadanymi liczbami. Są to podyktowane względami praktycznymi ograniczenia na wartości, moc lub energię sygnału sterującego.

II. Ograniczenia dla trajektorii $y(t)$ wynikające z ograniczonych możliwości ruchu, sprowadzające się ogólnie do następującego wymagania:

$$\bigwedge_{t \in [0, T]} y(t) \in D_y \subset Y,$$

gdzie D_y jest zadanym obszarem w przestrzeni ruchu Y manipulatora, np. $y^{(i)}(T) \leq \alpha_i$, gdzie α_i są zadanymi liczbami, dla $i = 1, 2, \dots, l$. W efekcie określony jest pewien obszar roboczy, którego punkty możliwe są do osiągnięcia przez chwytak manipulatora.

III. Ograniczenia wynikające z konieczności unikania kolizji, tj. omijania przeszkód, które istnieją lub mogą pojawić się w przestrzeni ruchu oraz unikania zderzenia z innymi poruszającymi się obiektami. Ogólnie, ograniczenie sprowadza się do wymagania:

$$\bigwedge_{t \in [0, T]} y(t) \neq \bar{y}(t), \quad (5)$$

gdzie $\bar{y}(t)$ oznacza trajektorię ruchu poruszającej się przeszkody. W bardziej skomplikowanych przypadkach należy również uwzględnić "geometrię"

obiektu sterowania ruchem jako złożonego mechanizmu, stwarzającą dodatkową możliwość kolizji, oprócz wyeliminowanej warunkiem (5). Dokładniej mówiąc - położenia $y(t)$ i $\bar{y}(t)$ określają w zależności od kształtu obiektu pewne obszary zajętości w przestrzeni Y - odpowiednio $D_z(t)$ i $\bar{D}_z(t)$, które nie mogą mieć punktów wspólnych, tzn.

$$\bigwedge_{t \in [0, T]} D_z(t) \cap \bar{D}_z(t) = \emptyset. \quad (6)$$

Wymagania (5) można zaostrzyć dla zachowania określonej odległości od przeszkody, tzn.

$$\bigwedge_{t \in [0, T]} \|y(t) - \bar{y}(t)\| \geq \alpha. \quad (7)$$

W szczególności $\bar{y}(t) = \bar{y} = \text{const}$, jeśli położenie przeszkody jest stałe. Dla realizacji systemu sterowania ważne jest ponadto rozróżnienie przypadków, gdy $\bar{y}(t)$, a w szczególności $\bar{y} = \text{const}$, jest znane a priori projektantowi systemu oraz, gdy $\bar{y}(t)$ nie jest z góry znane; wartość $\bar{y}(t)$ może być mierzona na bieżąco dla poszczególnych t i wprowadzana do algorytmu sterowania.

IV. Dodatkowe wymagania dla trajektorii ruchu $y(t), \dot{y}(t)$ w czasie sterowania, np. ograniczenia dla prędkości. Wymagania te wiążą się z celem sterowania, tj. ograniczeniami na $x(t)$ uwzględnionymi w punkcie I, dotyczącym celu sterowania. Oprócz wymienionych sformułowań ogólnych należy jeszcze zwrócić uwagę na ważne przypadki szczególne lub specjalne, związane najczęściej z osłabieniem wymagań sprecyzowanych poprzednio. Np. stawiamy wymaganie sterowania bez przeregulowania, tzn. w czasie sterowania $y^{(i)}(t) \leq y^{(i)*}$.

Ze względu na możliwość wystąpienia zmieniających się zakłóceń, konieczność bieżących pomiarów $y^x(t)$ i/lub $\bar{y}(t)$ oraz niedokładną znajomość opisu działania obiektu, tj. zależności $y(t)$ od nastaw sterujących - system sterowania ruchem powinien być systemem zamkniętym. Wtedy wyznaczenie odpowiedniego sterowania $u(t)$ sprowadza się do wyznaczenia algorytmu regulacji dla regulatora ruchu manipulatora, co w nowoczesnych realizacjach oznacza najczęściej wyznaczenie programu sterującego dla komputera sterującego ruchem. Fakt, że rozważany obiekt sterowania jest istotnie wielowymiarowy i istotnie nieliniowy, powoduje trudności w wyznaczaniu algorytmów sterowania ruchem manipulatora, a w związku z tym konieczność opracowywania specjalnych metod i algorytmów sterowania w oparciu o znane metody ogólne. Można zaproponować dwie następujące koncepcje:

I. Uproszczenie modelu obiektu

Stosowanie znanych metod wyznaczania sterowania optymalnego dla wielowymiarowych i nieliniowych obiektów (programowanie dynamiczne, zasada maksimum i in.) nawet dla prostych obiektów związane jest z koniecznością korzystania z odpowiednich metod numerycznych i dużymi komplikacjami obliczeniowymi.

Popularnym sposobem upraszczania jest linearyzacja. Stosowanie różnych formalnych metod linearyzacji wyrażeń nieliniowych (np. rozwijanie w szereg i uwzględnianie jego pierwszych składników) nie jest sposobem godnym polecenia w przypadku istotnych nieliniowości, nie uwzględnia ono bowiem jakości uproszczonego modelu, a tym bardziej - jakości (pogorszenia) sterowania uzyskanego w oparciu o model uproszczony. Dlatego sposobem, który można rekomendować, jest aproksymacja najlepszego modelu modelem liniowym. Idea dla modelu dyskretnego opisanego za pomocą wektora stanu jest następująca:

a) model początkowy obiektu $x_{k+1} = f(x_k, y_k)$,

b) uproszczony model liniowy $\bar{x}_{k+1} = A \bar{x}_k + B u_k$,

gdzie A i B oznaczają macierze współczynników. Dla zadanego ciągu u_0, u_1, \dots, u_m oraz danego $x_0 = \bar{x}_0$ należy wyznaczyć takie wartości elementów macierzy A, B , które minimalizują:

$$Q_m = \sum_{k=1}^{m+1} \bar{\varphi}(x_k, \bar{x}_k),$$

gdzie $\bar{\varphi}$ oznacza najczęściej odległość x_k od \bar{x}_k .

II. Uproszczenie zadania sterowania

Jak już wspomniano, zadanie sterowania optymalnego można zastąpić zadaniem sterowania tylko zadowalającego, które jest na ogół łatwiejsze do wyznaczenia. W porównaniu z metodą upraszczania modelu wyższość tego sposobu polega na tym, że otrzymane rozwiązanie spełnia zadane wymaganie dotyczące jakości, choć nie jest optymalne. Oprócz wymienionego istnieją inne sposoby upraszczania wymagań i otrzymywania sterowań "suboptymalnych", które są akceptowalne wtedy, jeśli można ocenić jakość sterowania i uznać za zadowalające. Można tu wymienić koncepcję "point to point". Jej idea polega na minimalizacji $\varphi(x_n, x_n^*)$ dla każdego n i znanego x_{n-1} , gdzie φ oznacza lokalne kryterium jakości, które występowało poprzednio w sformułowaniach problemów sterowania dla obiektu ciągłego (sformułowania dla obiektu dyskretnego są analogiczne). Uwzględniając model $x_{n+1} = f_n(x_n, u_n)$ i minimalizując względem u_{n-1} $\varphi[f(x_{n-1}, u_{n-1}), x_n^*]$ otrzymujemy zależność u_{n-1} od x_{n-1} , czyli algorytm sterowania. Przy stosowaniu numerycznej metody minimalizacji jest to procedura wyznaczania u_{n-1} po zmierzeniu wartości x_{n-1} - przeznaczona do realizacji komputerowej. Badania symulacyjne odpowiedniego systemu sterowania pozwalają na ocenę jakości sterowania i ewentualną akceptację.

III. Parametryczne zadanie wyznaczania sterowania

Zadanie upraszcza się, jeśli założymy określoną postać algorytmu sterowania z wektorem parametrów b . Wówczas należy wyznaczyć wartość b , dla której spełnione będą określone wymagania dotyczące sterowania, a w przypadku optymalizacji wyznaczyć zależność $Q(b)$ i minimalizować tę funk-

cję względem b . Zwykle zarówno do wyznaczenia wartości Q dla określonego b , jak i do minimalizacji stosować trzeba określone procedury numeryczne. W tej koncepcji mieszczą się często opisywane w literaturze i stosowane w praktyce zastosowania liniowych regulatorów, w których wyznacza się parametry regulatora (np. PID) dla spełnienia określonych wymagań lub dla parametrycznej optymalizacji, a także stosuje się różnego rodzaju liniowe korektory przy podstawowym regulatorze.

3. Sterowanie ruchem manipulatora robota przemysłowego IRb-6

Niektóre z wymienionych w rozdz. 2 koncepcji sterowania realizowane w Zespole Systemów Sterowania Instytutu Sterowania i Techniki Systemów Politechniki Wrocławskiej w odniesieniu do manipulatora robota przemysłowego IRb-6. Przyjęto, że dla tego konkretnego obiektu w modelu (1) stan jest zdefiniowany następująco:

$$\begin{aligned} x(t) &= [x^{(1)}(t), x^{(2)}(t), x^{(3)}(t), x^{(4)}(t), x^{(5)}(t), x^{(6)}(t)]^T = \\ &= [\phi_1(t), \dot{\phi}_1(t), \phi_2(t), \dot{\phi}_2(t), \phi_3(t), \dot{\phi}_3(t)]^T, \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie ϕ_1 - przesunięcie katowe kolumny pionowej manipulatora, ϕ_2 - przesunięcie katowe ramienia dolnego, ϕ_3 - przesunięcie katowe ramienia górnego.

Na zmienne stanu obowiązują ograniczenia:

$$D_x = \{x(t) : x_{\min}^{(i)} \leq x^{(i)}(t) \leq x_{\max}^{(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, 6\}. \quad (9)$$

Wielkościami sterującymi są prądy zasilające napędy poszczególnych osi manipulatora i obowiązują na nie ograniczenia w postaci:

$$D_u = \{u(t) : u_{\min}^{(i)} \leq u^{(i)}(t) \leq u_{\max}^{(i)}, \quad i = 1, 2, 3\}. \quad (10)$$

Ogólna postać równań stanu - po dokonaniu prostych, ale żmudnych przekształceń - może być przedstawiona w następującej formie:

$$\dot{\bar{x}}(t) = F(x(t)) \cdot u(t) + q(x(t)), \quad (11)$$

gdzie: F - macierz o wymiarach 6×3 , q - wektor o 6 współrzędnych. Dokładne formuły określające elementy macierzy F i wektora q są przedstawione w [8]. Opis (11) został wykorzystany do symulacji ruchu manipulatora - opracowanych algorytmów sterowania nie weryfikowano na realnym obiekcie. Układ równań różniczkowych (11) jest rozwiązywany w sposób numeryczny za pomocą metody Rungego-Kutty czwartego rzędu.

Opracowano algorytmy sterowania w różnych wersjach dla dwóch koncepcji sterowania wymienionych w rozdz. 2.

I. Uproszczenie modelu obiektu

Wykorzystano tu model obiektu dyskretnego w postaci:

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{A} \bar{x}_k + \bar{B} u_k + \bar{C} u_{k-1}, \quad (12)$$

gdzie elementy macierzy \bar{A} - o wymiarze 6×6 oraz \bar{B} i \bar{C} - o wymiarach 6×3 podlegają bieżącej identyfikacji w trakcie sterowania na podstawie

informacji o aktualnym stanie x_k oraz wartościach wielkości sterujących u_{k-1} i u_k . Do identyfikacji stosowano metodę najmniejszych kwadratów w wersji iteracyjnej - szczegóły są podane w [3,5]. Procedura identyfikacji powtarzana jest w każdym takcie sterowania dostosowując parametry modelu liniowego (12) do aktualnego punktu pracy. Przyjęcie takiej postaci modelu prowadzi do adaptacyjnego algorytmu sterowania. Algorytm sterowania był wyznaczany jako rezultat minimalizacji następującego globalnego kryterium jakości sterowania:

$$Q(\{\bar{u}_{N-1}\}) = \frac{1}{2} x_N^T S x_N + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N-1} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k), \quad (13)$$

gdzie: N - zadany horyzont sterowania,

S, Q, R - dane macierze współczynników o odpowiednich wymiarach,

$$\{\bar{u}_{N-1}\} = (u_0, u_1, \dots, u_{N-1}).$$

Kryterium to umożliwia wyznaczenie wartości wielkości sterujących optymalnych w całym horyzoncie sterowania i pozwalających na osiągnięcie stanu końcowego $x^N = \bar{0}$.

II. Uproszczenie zadania sterowania

Do wyznaczania algorytmów sterowania w tym przypadku był stosowany model uzyskany w wyniku dyskretyzacji modelu (11) poprzez rozwinięcie go w szereg Taylora do wyrazów drugiego rzędu włącznie wokół stanu $x_k = x(k \cdot h)$, k i h - numer i długość taktu sterowania. W rezultacie otrzymano model:

$$x_{k+1} = A_k(x_k, u_{k-1}) \cdot u_k + b_k(x_k, u_{k-1}), \quad k = 0, 1, \dots \quad (14)$$

Elementy macierzy A_k oraz wektora b_k są funkcjami wektora stanu w k -tym takcie sterowania oraz sterowań w takcie $(k-1)$ -szym. Przyjęto założenie, że sygnał sterujący $u_k = u(k \cdot h)$ jest stały w przedziale czasu $k \cdot h \leq t \leq (k+1) \cdot h$ oraz, ze względu na nieróżniczkowalność wielkości sterujących, odpowiednie pierwsze pochodne zastąpiono ilorazami różnicowymi. Uproszczenie zadania sterowania w tym przypadku polegało na przyjęciu strategii "point-to-point", która jest realizowana w wyniku minimalizacji następującego lokalnego kryterium jakości sterowania:

$$Q_k(u_k) = \sum_{i=1}^6 \alpha_i (x_{k+1}^{(i)} - x^N(i))^2, \quad (15)$$

gdzie: α_i , $i = 1, 2, \dots, 6$ - nieujemne współczynniki (parametry algorytmu sterowania; $x_{k+1}^{(i)}$ - i -ta zmienna stanu określona przez model manipulatora i zależna od sterowania u_k oraz od aktualnego stanu x_k , $i = 1, 2, \dots, 6$.

Kryterium to umożliwia wybór wartości wielkości sterujących u_k osobno dla poszczególnych taktów sterowania tak, aby minimalizować odległość od stanu końcowego x^N . Wyznaczanie algorytmu sterowania w oparciu o powyższe kryterium wymaga podania warunku zakończenia procesu sterowania. Jest to określone przez następujący warunek stopu:

$$\left(\sum_{i=1}^6 [x_k^{(i)} - x^{\pi(i)}]^2 \right)^{1/2} < \varepsilon, \quad (16)$$

gdzie: ε - zadana dokładność osiągnięcia stanu końcowego, $x_k^{(i)}$ - aktualna wartość i -tej zmiennej stanu wyznaczona, dla uzyskanych w poprzednim takcie wartości wielkości sterujących u_{k-1} , z modelu symulacyjnego, tj. poprzez numeryczne rozwiązanie układu równań różniczkowych (11).

W tej koncepcji sterowania opracowano algorytmy sterowania dla następujących przypadków:

- brak przeszkody w przestrzeni roboczej,
- występowanie znanej przeszkody stałej lub ruchomej,
- występowanie nieznannej przeszkody stałej lub ruchomej.

Dla ostatniego przypadku należało opracować algorytmy rozpoznawania przeszkody w przestrzeni ruchu - szczegóły są zamieszczone w [2,7].

Scharakteryzowane w tym punkcie metody określania algorytmów sterowania ruchem manipulatora robota IRb-6 posłużyły do wyznaczania odpowiednich algorytmów sterowania, które zostały zrealizowane w postaci programów komputerowych na mikrokomputer klasy IBM PC/AT, który jest traktowany jako urządzenie sterujące. Zestaw tych programów został opracowany w postaci systemu informatycznego ROBDESIGN, który oprócz realizacji odpowiednich algorytmów sterowania może być wykorzystywany przy projektowaniu mikrokomputerowego systemu sterowania ruchem manipulatora. Umożliwia on m.in.

wyбір najbardziej odpowiedniego - w określonym sensie - algorytmu sterowania i takiego zestawu jego parametrów, które po zastosowaniu w rzeczywistym systemie zapewnią najkorzystniejsze przebiegi trajektorii ruchu manipulatora oraz sygnałów sterujących [4,6].

4. Przykład obliczeniowy

Poniżej zostanie przedstawiony przykład symulacji sterowania ruchem manipulatora robota przemysłowego IRb-6 wykorzystujący drugą z koncepcji sterowania przedstawionych w rozdz. 3, polegającą na uproszczeniu zadania sterowania. Dla danych:

- obiektu opisanego modelem (14),
- stanu początkowego $x_0 = [\phi_{1,0}, 0, \phi_{2,0}, 0, \phi_{3,0}, 0]^T$,
- stanu końcowego $x^{\pi} = [\phi_{1,\pi}, 0, \phi_{2,\pi}, 0, \phi_{3,\pi}, 0]^T$,
- ograniczeń na zmienne stanu (9) i sterowania (10),
- dokładności osiągnięcia stanu końcowego ζ ,
- masy ładunku przenoszonego przez manipulator

należy wyznaczyć ciąg wielkości sterujących u_k , $k = 0, 1, 2, \dots$ tak, aby w każdym takcie sterowania k minimalizować wartość kryterium (15), aż do spełnienia warunku stopu (16).

Model obiektu (14) jest liniowy ze względu na sterowania, liniowe są również ograniczenia (9) i (10), natomiast kryterium (15) jest kwadratowe. W związku z tym zadanie wyznaczania sterowań optymalnych w sensie

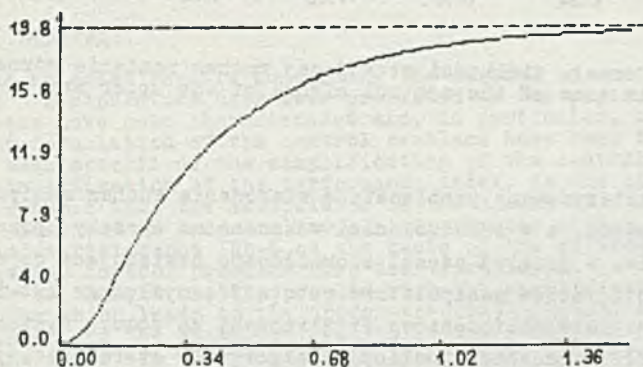
kryterium (15) jest zadaniem optymalizacji z kwadratowym wskaźnikiem jakości i z ograniczeniami liniowymi. Dokładna analiza postaci ograniczeń pokazuje, że obszar rozwiązań dopuszczalnych jest sumą sześciu obszarów wypukłych, dlatego rozwiązanie optymalne można wyznaczyć w sposób analityczny [7]. Uzyskany algorytm sterowania ma ogólną postać:

$$u_k^{\mathbb{N}} = H(x_k, u_{k-1}, x_0, x^{\mathbb{N}}, D_x, D_u, \alpha_1, \dots, \alpha_6) \quad (17)$$

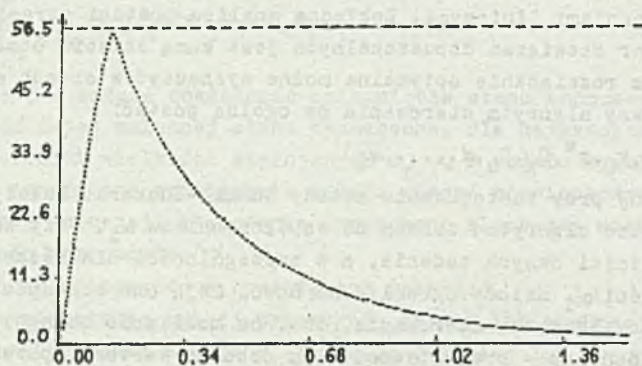
i został wyznaczony przy zastosowaniu metody Kuhna -Tuckera. Należy zwrócić uwagę, że postać algorytmu zależy od współczynników α_1 . Przy każdorazowej zmianie wartości danych zadania, a w szczególności dla różnych stanów x_0 i $x^{\mathbb{N}}$ wartości α_1 należy określić na nowo. Mają one zasadniczy wpływ na zbieżność algorytmu sterowania, tzn. na możliwość osiągnięcia zadanego stanu końcowego - przy niewłaściwym doborze wartości parametrów obiekt może być niesterowalny.

Na rys. 1, 2 i 3 przedstawiono przykładowe przebiegi odpowiednio zmian położenia, prędkości i sterowania dla ramienia górnego manipulatora uzyskane dla następujących danych:

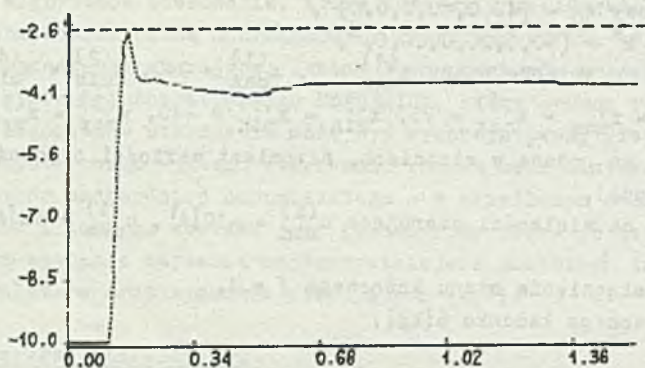
- stan początkowy $x_0 = [40, 0, 10, 0, 0, 0]^T$,
- stan końcowy $x^{\mathbb{N}} = [90, 0, 20, 0, 20, 0]^T$,
- ograniczenia na zmienne stanu $x_{\min}^{(1)} = 0$, $x_{\max}^{(1)} = 340$, $x_{\min}^{(2)} = x_{\min}^{(4)} = x_{\min}^{(6)} = 0$, $x_{\max}^{(2)} = x_{\max}^{(4)} = x_{\max}^{(6)} = 95$, $x_{\min}^{(3)} = x_{\min}^{(5)} = -40$, $x_{\max}^{(3)} = x_{\max}^{(5)} = 25$, (wartości położenia są podane w stopniach, natomiast wartości prędkości w stopniach na sekundę),
- ograniczenia na wielkości sterujące $u_{\min}^{(i)} = -10[A]$, $u_{\max}^{(i)} = 10[A]$, $i = 1, 2, 3$,
- dokładność osiągnięcia stanu końcowego $\xi = 1$,
- masa przenoszonego ładunku 6 [kg].



Rys. 1. Zmiany w czasie położenia ramienia górnego
Fig. 1. Changes in time of the position of the upper arm



Rys. 2. Zmiany w czasie prędkości ramienia górnego
 Fig. 2. Changes in time of the velocity of the upper arm



Rys. 3. Zmiany w czasie wielkości sterującej ruchem ramienia górnego
 Fig. 3. Changes in time of the control signal of the upper arm

5. Uwagi końcowe

W pracy scharakteryzowano problematykę sterowania ruchem manipulatorów robotów przemysłowych, a w szczególności wskazano na sposoby upraszczania zadania sterowania. W drugiej części sformułowano nawiązujące do nich dwa problemy sterowania ruchem manipulatora robota przemysłowego IRb-6 oraz zaprezentowano przykład obliczeniowy zrealizowany za pomocą systemu informatycznego ROBDESIGN. Badania symulacyjne algorytmów sterowania, przeprowadzone w oparciu o ten system, których wyniki nie są tu prezentowane (szczegóły są zawarte w [1,8]), wykazały przydatność prezentowanego podejścia do problematyki sterowania ruchem manipulatorów dla prostych przypadków, tzn. dla sytuacji braku przeszkody lub dla przypadku istnienia w przestrzeni roboczej przeszkody nieruchomej. W przypadku przeszkody rucho-

mej, czyli dla sytuacji zmiennych w czasie obszarów zajętości, a więc również ograniczeń na położenie manipulatora, uzyskane rezultaty mają charakter wstępny i niezbędne jest opracowanie bardziej efektywnych algorytmów rozpoznawania przeszkody.

LITERATURA

- [1] Czekała M., Grygiel B., Madera P.: Mikrokomputerowe sterowanie ruchem manipulatora. Instytut Sterowania i Techniki Systemów Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR, nr 6/90, Wrocław 1990.
- [2] Grygiel B., Madera P.: Pewne problemy rozpoznawania przy sterowaniu ruchem manipulatora. Materiały I Krajowej Konferencji Naukowej "Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe", Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
- [3] Grygiel B.: Pakiet programów AdMaSter do symulacji adaptacyjnego sterowania ruchem manipulatora. Instytut Sterowania i Techniki Systemów Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR, nr 8/90, Wrocław 1990.
- [4] Józefczyk J., Kilanowski S.: An algorithm of adaptive control for some manipulators. Systems Science, vol. 14, no 4, 1988.
- [5] Józefczyk J.: Podstawy systemu informatycznego ROBDESIGN dla potrzeb sterowania ruchem manipulatorów robotów przemysłowych. Archiwum Informatyki Teoretycznej i Stosowanej (zgłoszone do publikacji).
- [6] Madera P.: Computer systems for simulation and control of manipulators. Proc. of 6th Int. Conf. on Systems Engineering, Coventry, 1991.
- [7] Martowski K., Józefczyk J.: Zastosowanie metod sztucznej inteligencji a w szczególności rozpoznawania w mikrokomputerowym systemie sterowania ruchem manipulatora. Instytut Sterowania i Techniki Systemów Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR, nr 8/88, Wrocław 1988.
- [8] Kilanowski S., Martowski K.: Badania modelowe wybranego algorytmu sterowania dyskretnego ruchem manipulatora na przykładzie robota IRB-6. Instytut Sterowania i Techniki Systemów Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR, nr 25/87, Wrocław 1987.

Recenzent: Prof.dr h.inż. Jerzy Klamka

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1992 r.

Abstract:

The selected results concerning the control of motion of the industrial robot manipulators have been presented in the paper. First, the control problems have been characterized and, in particular, the simplifications of the formulation of the control problems have been discussed. Two cases have been specified: the simplification of the control plant model and the simplification of the performance index. In the investigations it has been assumed that the manipulator is the nonlinear and multivariable control plant and as a controller a microcomputer system is used. Then, for the industrial robot IRB-6 on the basis of the methodology introduced before two control problems have been formulated.

One of them, i.e., the problem with the simplification of the performance index which leads to the "point-to-point" control strategy has been discussed and the exemplary results of the numerical calculations concerning the upper arm of the robot in the form of time diagrams obtained using the computer system ROBDESIGN have been presented.