

II OGÓLNOPOLSKA KONFERENCJA TEORII MASZYN
I MECHANIZMÓW

11th POLISH CONFERENCE ON THE THEORY OF MACHINES
AND MECHANISMS

27-30. 04. 1987 ZAKOPANE

Czary RZYMKOWSKI

Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Politechnika Warszawska

PROGRAMY DO WSPOMAGANEGO KOMPUTEROWO MODELOWANIA OTWARTYCH ŁAŃCUCHÓW
KINEMATYCZNYCH Z NAPĘDAMI HYDRAULICZNYMI I PNEUMATYCZNYMI - INFORMACJE
OGÓLNE, WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA

Streszczenie. W referacie przedstawiono ogólne informacje o opracowanym przez autora, w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, pakiecie programów do komputerowego wspomagania modelowania i symulacji robotów przemysłowych z napędem hydraulicznym i pneumatycznym. Przedstawiono również opis specjalnego stanowiska do doświadczalnej weryfikacji poprawności części napisanych programów. Uzyskano dobrą zgodność wyników symulacyjnych i doświadczalnych.

Omawiany pakiet, w sposób automatyczny, generuje równania ruchu - w postaci symbolicznej - dla otwartych łańcuchów kinematycznych o sztywnych członach (w oparciu o formalizm równań Lagrange'a drugiego rodzaju), a także równania stanu dla pewnej klasy napędów hydraulicznych i pneumatycznych wraz z odpowiednimi zależnościami pomocniczymi.

Wszystkie programy napisane są w języku FORTRAN (Microsoft V3.30) i zaimplementowane na mikrokomputerze IBM PC.

1. Wstęp

Coraz powszechniejsze stosowanie symulacji komputerowej na etapie projektowania robotów, a także wykorzystywanie komputerów do ich sterowania, wymaga ciągłego doskonalenia metod tworzenia modeli symulacyjnych. Duża złożoność układu mechanicznego stanowiącego manipulator powoduje, że jego modelowanie jest zagadnieniem bardzo pracochłonnym. Uzyskanie opisu dostatecznie dokładnego a jednocześnie możliwie prostego - co jest szczególnie istotne przy wykorzystywaniu modelu do sterowania w trybie "on-line" - jest zadaniem trudnym. Od około 20 lat problematyka tworzenia modeli

symulacyjnych zajmują się coraz liczniejsze ośrodki na całym świecie. Prowadzone są prace zarówno w zakresie tworzenia coraz sprawniejszych procedur o charakterze czysto numerycznym, jak też komputerowego wyprowadzania układów równań różniczkowych opisujących modelowany układ. Przegląd aktualnych osiągnięć w zakresie pierwszego nurtu zawiera praca [6]. Kierunek drugi reprezentują pozycje [2] i [3].

Istnieje bardzo bogate piśmiennictwo w zakresie omawianego tematu. Tak na przykład, spis najważniejszych pozycji literatury dotyczącej zagadnień dynamiki układów wielomasowych [7], z których znaczna część dotyczy modelowania układów mechanicznych typu robot (o członach sztywnych i podatnych), zawiera ponad 350 tytułów.

Niniejsza praca poświęcona jest opracowanemu przez autora w latach 1983-1986, w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej PW, pakietowi programów do komputerowego wspomagania modelowania robotów przemysłowych z napędem hydraulicznym i pneumatycznym. Pakiet ten może być również użyty do wspomagania procesu modelowania innych maszyn, których struktura kinematyczna może być uznana za łańcuch otwarty o sztywnych członach, a także do modelowania samych instalacji hydraulicznych czy pneumatycznych, jeżeli spełnione są odpowiednie warunki. Kolejne programy generują (w postaci symbolicznej) ciągi wyrażeń, zgodnych z wymogami FORTRAN-u, dając ostatecznie procedurę "prawych stron" dla układu równań opisujących modelowanego robota wraz z napędem. W skład pakietu wchodzi również dwa, współpracujące ze sobą, programy do prezentacji wyników eksperymentów symulacyjnych w postaci tabelarycznej i graficznej (wykresy na ekranie z możliwością kopiowania na drukarce lub ploterze).

Omawiana wersja zaimplementowana jest na mikrokomputerze IBM PC pracującym pod systemem operacyjnym DOS (wersja 2.00 lub wyższe). Wszystkie programy napisane są zgodnie ze standardem języka FORTRAN firmy Microsoft wersja 3.30.

Praca [4] zawiera opisy algorytmów, na których oparto poszczególne programy; [5] jest typową instrukcją użytkownika zawierającą szczegółowe wskazówki umożliwiające posługiwanie się pakietem.

2. Modelowanie elementów mechanicznych

Ponieważ szczegóły przyjętego sposobu modelowania układów mechanicznych stanowiących otwarte łańcuchy kinematyczne były już przedmiotem kilku prac autora (np. [4]), nie będą tu przytaczane.

Poniżej podano kilka informacji ogólnych. Za podstawę do generowania równań ruchu przyjmuje się metodę Lagrange'a. Układ rzeczywisty sprowadza się do kinematycznie równoważnej postaci łańcucha z parami V klasy. Przesunięcia w parach (przesuw lub obroty) przyjmuje się za współrzędne uogólnione.

Jako dane konieczne do automatycznego wygenerowania odpowiednich wyrażeń określających równania ruchu elementów mechanicznych wprowadzić należy: po trzy parametry geometryczne dla każdej pary kinematycznej, niezbędne do określenia macierzy transformacji między dwoma sąsiednimi układami lokalnymi (zgodnie z metodą Hartenberga-Denavita)

- masy oraz położenia środków mas poszczególnych elementów,
- składowe tensora bezwładności dla każdego członu.

Wprowadzanie informacji o siłach działających na układ odbywa się przez podanie:

- punktu przyłożenia siły względem dowolnego układu lokalnego związanego sztywno z jednym z elementów ruchomych (lub globalnego związanego z podstawą)
- dwóch punktów wyznaczających kierunek działania siły (na przykład dla sił pochodzących od sprężyn lub siłowników mogą to być punkty ich zaczepienia do odpowiednich elementów łańcucha)
- zależności określających wartość siły w funkcji czasu, współrzędnych i prędkości ogólnych, ciśnień panujących w komorach siłowników, itp.

Siły ciężkości uwzględniane są w sposób automatyczny, konieczne jest tylko podanie współrzędnych wektora przyspieszenia ziemskiego względem globalnego układu odniesienia.

W punkcie 3 podano przykład wprowadzania danych dla łańcucha o trzech stopniach swobody wykorzystywanego do weryfikacji doświadczalnej generowanych modeli. Szczegóły dotyczące przygotowania danych do modelowania napędów hydraulicznych i pneumatycznych oraz instalacji towarzyszących znaleźć można w pracy [5]. Omawiany pakiet pozwala również na dołączenie opracowanego wcześniej modelu zespołu napędowego (hydraulicznego lub pneumatycznego) do układu równań różniczkowych opisujących ruch części mechanicznych. Przykład takiego zastosowania pakietu do komputerowego wygenerowania modelu symulacyjnego robota RIMP-901 o napędzie hydraulicznym przedstawiono w pracy [1].

Warto podkreślić pewną szczególną zaletę, przyjętej przez autora, metody Hartenberga-Denavita do opisu transformacji współrzędnych między dwoma układami lokalnymi sztywno związanymi z sąsiadującymi elementami łańcucha. Przy tworzeniu równań ruchu w oparciu o metodę Lagrange'a konieczne jest wykonywanie operacji różniczkowania macierzy transformacji z układu π_1 do π_j względem odpowiednich współrzędnych uogólnionych.

$$\frac{\partial A_{i,j}}{\partial q_k} = A_{k-1,j} \frac{dA_{k,k-1}}{dq_k} A_{i,k}$$

(1)

Zastosowanie metody Hartenberga-Denavita umożliwia zastąpienie operacji różniczkowania mnożeniem przez specjalną macierz, taką że

$$\frac{dA_{k,k-1}}{d\alpha_k} = D_k A_{k,k-1} \quad (2)$$

gdzie:

$$D_k = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad - \text{ dla pary obrotowej} \quad (3)$$

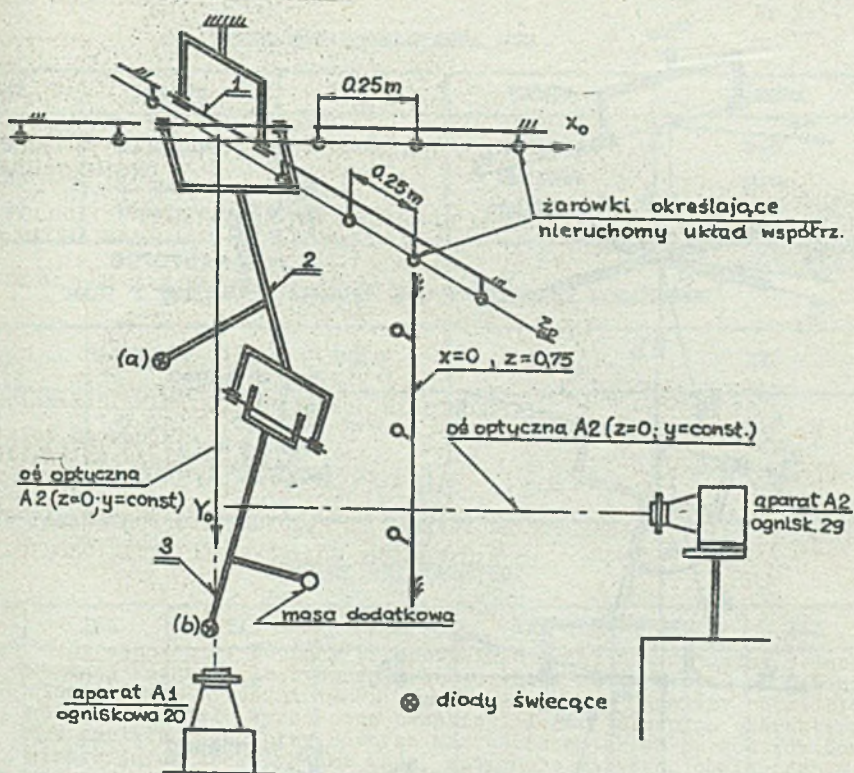
$$D_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad - \text{ dla pary postępowej} \quad (4)$$

Ma to ogromne znaczenie zarówno w przypadku tworzenia równań w postaci symbolicznej, jak też przy budowie algorytmów czysto numerycznych. Fakt ten zasługuje na szczególne podkreślenie, ponieważ nie jest jeszcze powszechnie znany nawet wśród specjalistów z dziedziny robotyki.

3. Weryfikacja doświadczalna

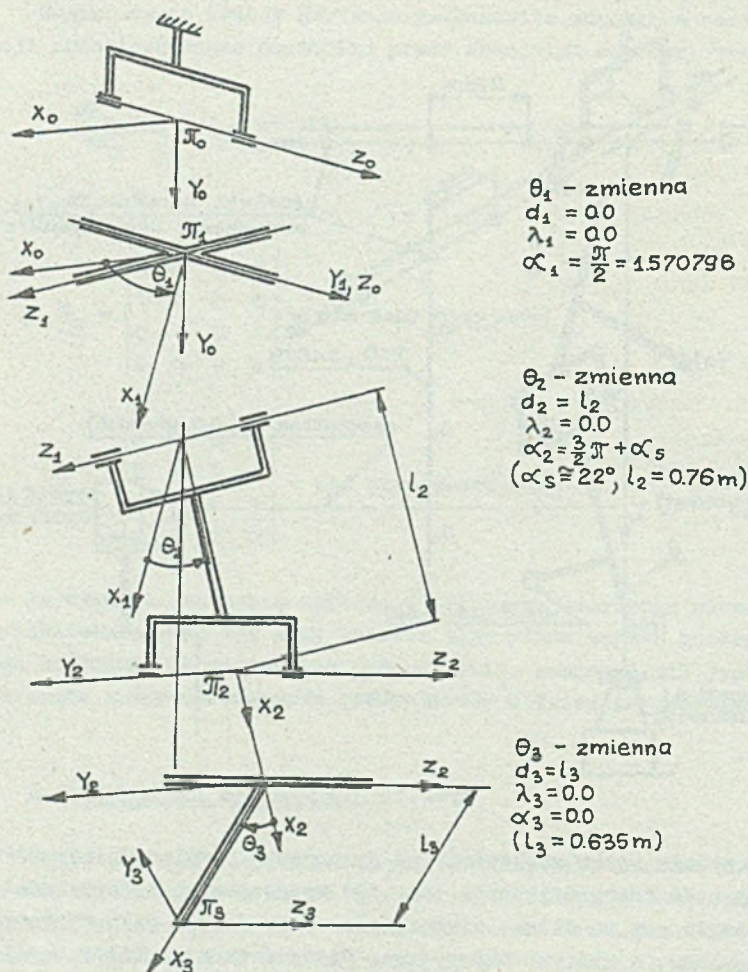
Najlepszym potwierdzeniem poprawności modelu symulacyjnego danego obiektu fizycznego jest zgodność wyników uzyskanych dla eksperymentów cyfrowych przeprowadzanych na modelu z wynikami badań doświadczalnych rzeczywistego obiektu. Dlatego też, zostały przeprowadzone badania doświadczalne mające na celu sprawdzenie jakości opracowanych programów do automatycznego modelowania otwartych, przestrzennych łańcuchów kinematycznych o sztywnych członach. Zbudowano specjalne stanowisko doświadczalne, szkicowo przedstawione na rysunku 1.

Skonstruowany mechanizm jest zbliżony do idealnego przestrzennego łańcucha kinematycznego (otwartego) o sztywnych członach z trzema parami obrotowymi V klasy. Dwa pierwsze stopnie swobody (licząc od miejsca zamocowania) realizowane są przez przegub Cardana, trzeci zapewnia para obrotowa łącząca element drugi z trzecim. Dzięki możliwości dołączenia mas skupionych w różnych miejscach dwóch dolnych członów (2 i 3) można badać ruch układu dla szerokiego zakresu zmian współrzędnych tensora bezwładności (np. momenty dewiacyjne mogą być bliskie zeru lub bardzo duże). Zmianie ulegają również położenia środków mas elementów 2 i 3 względem lokalnych układów współrzędnych π_2, π_3 związanych sztywno z tymi elementami.



Rys. 1

Do rejestrowania ruchu mechanizmu na stanowisku doświadczalnym używa się dwóch aparatów fotograficznych (A1, A2) wyposażonych w odpowiednie obiektywy - takie aby na filmie mieścił się obraz całego toru wybranych punktów mechanizmu, w których umieszczono diody świecące. Diody zasilane są z generatora pracującego z częstotliwością 20 Hz, co umożliwia szacunkowe określenie prędkości ruchu. Bada się swobodny ruch układu w ziemskim polu grawitacyjnym. Zdjęć dokonuje się w ciemności, zwalniając jednocześnie nitkę podtrzymującą układ w położeniu początkowym i włączając generator przy otwartych migawkach (B). Po upływie 2 sekund generator jest wyłączony przez zegar elektroniczny. Powstają w ten sposób, dla różnych rozkładów mas i różnych warunków początkowych, pary zdjęć z aparatów A1, A2 zawierających torzy punktów świetlnych rzutowanych na dwie wzajemnie prostopadłe płaszczyzny błon fotograficznych. Jednocześnie z diodami włączane są żarówki wyznaczające osie globalnego układu współrzędnych związane go z belką, do której zamocowano cały układ mechaniczny. Przed rejestracją toru dla każdego przypadku fotografuje się położenie układu nieruchomego (przed przecięciem nitki). Pozwala to określić warunki początkowe dla każdego eksperymentu.




Rys. 2

Aby tworząc model symulacyjny układu doświadczalnego można było skorzystać z omawianego pakietu z poszczególnymi elementami ruchowymi związać należy lokalne układy współrzędnych zgodnie z metodą Hartenberga-De-navita (rys. 2).

Ponieważ masę "krzyżaka" w przegubie Cardana można pominąć, tablicę MECHANIZM.DAN, zawierającą informacje o strukturze, geometrii, masach i ich rozkładach, wypełnić należy w sposób pokazany poniżej.

DANE DLA MECHANIZMU: 000

PARA	ALFA	D	THETA	LAMBDA
1(0)	1.570796	0.0	ZMIENNA	0.0
2(0)			ZMIENNA	0.0
3(0)	0.0		ZMIENNA	0.0

MASY I POŁOŻENIA ŚRODKÓW MAS W UKŁADACH LOKALNYCH

	M	RX	RY	RZ
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2				
3			0.0	0.0

TENSORY BEZWŁADNOŚCI

	IXX	IYY	IZZ	IXY	IXZ	IYZ
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2						
3						

Data aktualizacji: 1986-06-II

UWAGI: Dane dla przykładu "eksperymentalnego".

Puste miejsca wypełnia się dopiero przed rozpoczęciem symulacji. Odpowiednie wartości liczbowe zmieniają się dla różnych eksperymentów w zależności od kombinacji mas dodatkowych.

Ponieważ badany jest ruch mechanizmu wyłącznie pod wpływem sił ciężkości, w tablicy SIŁY.DAN podaje się tylko składowe wektora przyspieszenia ziemskiego g względem globalnego układu odniesienia T_0 , a także informacje o tym, że masa elementu 1 jest zerowa.

Dane ogólne:

- o - liczba sił czynnych (bez sił ciężkości)
- o - liczba momentów czynnych
- o - liczba ...punktów kierunkowych..

Dane szczegółowe:

Usytuowanie wektora przyspieszenia g względem P10:

$G(1) = 9.81$

$G(2) = 0.0$

$G(3) = 0.0$

Masy zerowe dla brył:

023456789

Siły czynne

	Punkt przyłożenia	NPI	NP1	NP2	NK1	NK2	

NPI - Nr układu, w którym określono pkt. przyłożenia

NP1, NP2 - ..punkty kierunkowe.. I-tęj siły

NK1, NK2 - dla sił pochodzących od siłowników P-II, numery komór

..Punkty kierunkowe..

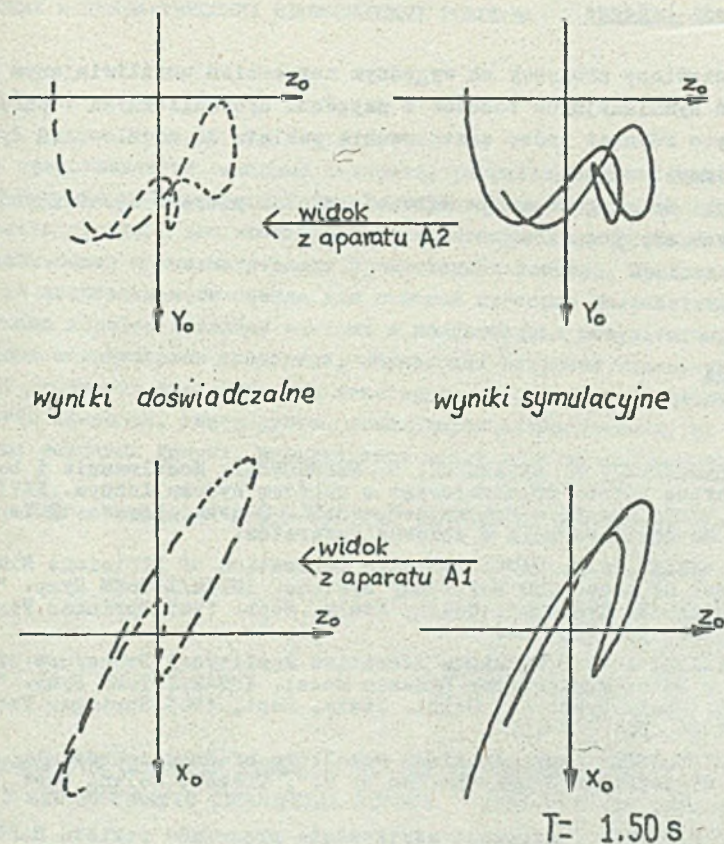
	Współrzędne	NPI

NPI - numery układów lokalnych, względem których określono współrzędne ..punktów kierunkowych..

Data aktualizacji: 1986-06-II

UWAGI: Dane dla przykładu "eksperymentalnego"

Dane zawarte w tablicach MECHANIZM.DAN, SIŁY.DAN wystarczają do wygenerowania, przez odpowiednie programy omawianego pakietu, procedury FCT (prawych stron). Dalej następuje kompilacja tekstu źródłowego FCT i linkowanie ze standardowymi dla pakietu modułami pomocniczymi (program główny SYM z procedurami OUTP i DANSYM, procedury RKGS i ROWLIN) oraz z odpowiednią biblioteką właściwą dla użytego kompilatora. W omawianym przypadku dodatkowo dołączana jest procedura EKTRAN wraz ze zbiorem procedur obsługi graficznej ekranu AGRAPH firmy "Computex Ltd.". Umożliwia to, oprócz zapisu danych przez procedurę OUTP na zbiór pomocniczy do dalszej obróbki programami PLOTB+PLOTB, kreślenie na bieżąco w czasie symulacji torów wybranych punktów na ekranie monitora. Są to obrazy tych samych punktów, w których na stanowisku doświadczalnym umieszczono diody świecące. Rysunek 3 przedstawia kopię ekranu uzyskaną za pomocą drukarki mozaikowej dla



Rys. 3

Jednego z przebiegów symulacyjnych. Dla porównania z lewej strony nanie-
siono wyniki zarejestrowane przez aparaty fotograficzne.

Ponieważ, ze względu na ograniczoność miejsca, do rejestracji torów
na stanowisku doświadczalnym konieczne jest używanie obiektywów szeroko-
kątnych, na otrzymanych obrazach występują poważne zniekształcenia. Aktu-
alnie opracowywany jest odpowiedni program, pozwalający uwzględniać defor-
macje wprowadzane przez obiektywy. Umożliwi on zarówno znacznie precyzyj-
niejsze określenie warunków początkowych, wykorzystywanych do przeprowa-
dzenia eksperymentów symulacyjnych, jak też dokonywanie porównań ilości-
owych. Wstępne porównania, których przykład przedstawiono na rys. 3, wska-
zuje na dobrą zgodność wyników pod względem jakościowym.

4. Uwagi końcowe

Przedstawione programy są wygodnym narzędziem umożliwiającym prowadzenie badań symulacyjnych robotów z napędami hydraulicznymi i pneumatycznymi. Podjęto również próbę zastosowania pakietu do modelowania dynamiki ko-
parek hydraulicznych.

Kierunki dalszego rozwoju zależą będą od potrzeb zgłaszanych przez po-
tencjalnych użytkowników.

LITERATURA

- [1] W..FLADZIŃSKI, K. NAZARCZUK, C. RZYMKOWSKI: Modelowanie i badania symulacyjne robota przemysłowego z napędem hydraulicznym. XXVI Sympozjon "Modelowanie w Mechanice", Beskid Śląski, marzec 1987. Praca przyjęta do opublikowania w zbiorze referatów.
- [2] P.E. NIELAN, T.R. KANE: Symbolic Generation of Efficient Simulation/Control Routines for Multibody Systems. IUTAM/IFToMM Symp. "Dynamics of Multibody Systems", Udine, Italy, Sept. 1985 Springer Verlag, Berlin 1986, pp. 153-164.
- [3] M. RENAUD: A Near Minimum Iterative Analytical Procedure for Obtaining a Robot-Manipulator Dynamic Model. IUTAM/IFToMM Symp. "Dynamics of Multibody Systems", Udine, Italy, Sept. 1985 Springer Verlag, Berlin 1986, pp. 201-212.
- [4] C. RZYMKOWSKI: Computer Aided Modelling of Pneumo-Hydraulic Robots. With Cism-IFToMM Symp. "Romania 86", Cracow, Poland Sept, 1986. Preprints, pp. 121-128.
- [5] C. RZYMKOWSKI: Instrukcja użytkownika programów pakietu SASNA1. Politechnika Warszawska, ITLiMS, Zespół Modelowania i Symulacji Komputerowej w Budowie Maszyn, Warszawa 1986 (praca niepublikowana).
- [6] R. SCHWERTASSEK, R.E. ROBERSON: A Perspective on Computer Oriented Multibody Dynamical Formalism and their Implementations. IUTAM/IFToMM Symp. "Dynamics of Multibody Systems", Udine, Italy, Sept. 1985 Springer Verlag, Berlin 1986, pp. 261-273.
- [7] R. SCHWERTASSEK: References on Multibody System Dynamics Simulation. DFVLR, Oberpfaffenhofen, Oct. 1985, Kopia uzyskana od autora.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СИМУЛЯЦИИ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

ИЗВЕ

В работе представляются основные свойства, разработанного в Институте Авиационной Техники и Прикладной Механики Варшавского политехнического института, пакета программ для компьютерного моделирования и симуляции гидравлических и пневматических промышленных роботов. Представляется описание испытательного стенда для опытной проверки разработанных программ. Получено хорошее согласие опытных и компьютерных результатов. Уравнения движения механических элементов, образующих открытые кинематические цепи, а также уравнения состояния для некоторого класса гидравлических и пневматических приводов, генерируются компьютером автоматически, на основании простых исходных данных. Используется метод уравнений Лагранжа второго рода.

Все программы написаны на языке FORTRAN (Microsoft V3.30) для компьютера IBM PC.

PROGRAM PACKAGE FOR COMPUTER AIDED MODELLING AND SIMULATION
OF HYDRAULIC AND PNEUMATIC INDUSTRIAL ROBOTS

Summary

The paper presents main information about the package of programs for computer modelling and simulation of industrial robots with hydraulic and pneumatic drives, which has been worked out Warsaw University of Technology (Institute of Aircraft Engineering and Applied Mechanics). The description of the special stand for experimental verification of the written programs is presented, too. A good consistence of experimental and simulation results has been obtained.

Equations of motion for mechanical elements of an open kinematic chain with rigid bodies, together with the state equations for a certain class of hydraulic and pneumatic drives and necessary auxiliary relationships are generated - in symbolical form - by the package, using simple input information. The Lagrangian formalism is used to derive the equations of motion.

All of the programs are written in FORTRAN (Microsoft V3.30) and implemented on IBM PC microcomputers.

Recenzent: dr inż. Tadeusz Klia

Wpłynęło do redakcji 11.XI.1986 r.