

Piotr GRUSZKA¹

ANALIZA DYNAMIKI UKŁADU KINEMATYCZNEGO DŹWIGNIOWEGO Z PRZEKŁADNIĄ KULOWĄ DO NAPĘDU RAMIENIA MANIPULATORA

W artykule przedstawiono problematykę syntezy wybranych wymiarów konstrukcyjnych płaskiego mechanizmu dźwigniowego, zawierającego w swej strukturze kinematycznej przekładnię śrubową toczną. Mechanizm ten wykorzystano do napędu ramion równoległoboku przegubowego wchodzącego w skład łańcucha kinematycznego manipulatora antropomorficznego z ortogonalną końcówką sferyczną.

Przedstawiono wyniki symulacji numerycznych dynamiki mechanizmu. Analizie poddano wpływ wybranych wymiarów konstrukcyjnych mechanizmu na przebiegi wymaganych momentów napędowych ramion równoległoboku dla realizacji zadanej trajektorii.

THE ANALYSIS OF DYNAMIC OF A LEVERING KINEMATIC ARRANGEMENT WITH A BALL SCREW USING TO DRIVE AN ARM OF THE MANIPULATOR

The paper presents the synthesis problem of the selected design dimensions of a flat lever mechanism, containing the ball screw in its kinematic structure. This mechanism is used to drive the arms of the parallelogram joints forming part of the kinematic chain of an anthropomorphic manipulator with the orthogonal spherical wrist.

The results of the numerical simulation of dynamics of the mechanism were presented. *There were analyzed* the influence of the design dimensions of the mechanism on the courses of the required driving torques of the arms of the parallelogram for the implementation of the given trajectory.

1. WSTĘP

W rozwiązaniach konstrukcyjnych robotów przemysłowych często wykorzystuje się konfigurację antropomorficzną (RRR) zawierającą zamknięty płaski łańcuch kinematyczny o dwóch stopniach swobody, w postaci równoległoboku przegubowego. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość zastosowania zdalnego napędu przedramienia od kolumny oraz odprężenia dynamicznego polegającego na wyeliminowaniu interakcji pomiędzy parametrami kinematycznymi ramienia i przedramienia manipulatora (z równań opisujących dynamikę odwrotną manipulatora usunięte zostają składniki zawierające siły Coriolisa i odśrodkowe) [1,6].

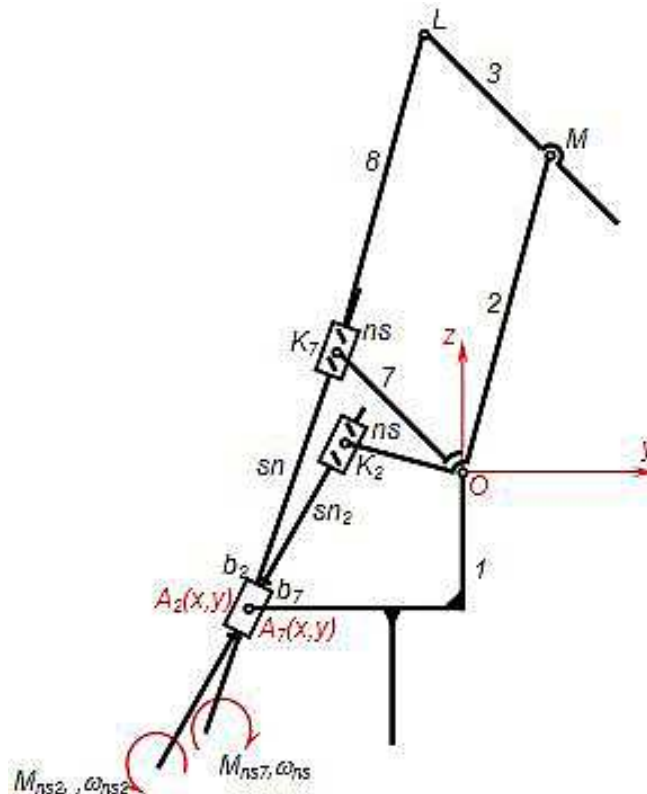
Do napędu ramion równoległoboku przegubowego stosowane są układy kinematyczne zawierające przekładnię śrubową toczną. Przekładnie te są od pewnego czasu powszechnie stosowane w liniowych układach napędowych. Ich zaletą jest to, że mogą przenosić znaczne obciążenia, charakteryzują się dużą sztywnością oraz dużą dokładnością pozycjonowania (dzięki możliwości wytworzenia napięcia wstępnego pomiędzy śrubą a nakrętką). Ich ważną cechą jest odwracalność ruchu posuwowego i obrotowego [2]. Włączenie przekładni śrubowej tocznej w łańcuch kinematyczny mechanizmu dźwigniowego układu napędowego ramion równoległoboku przegubowego powoduje, że oś obrotu śruby tocznej (jest ona jednym z członów mechanizmu dźwigniowego) wykonuje w płaszczyźnie równoległoboku przegubowego ruch obrotowy a nakrętka przekładni przemieszcza się ruchem złożonym. W związku z powyższym, kinematyka a szczególnie dynamika, charakteryzujące układ kinematyczny napędu ramion równoległoboku przegubowego jest o wiele bardziej złożona w porównaniu do klasycznych rozwiązań napędów liniowych.

W pracy przedstawiono wybrane problemy syntezy mechanizmu dźwigniowego z przekładnią śrubową toczną napędu ramienia i przedramienia manipulatora antropomorficznego z płaskim równoległobokiem przegubowym i ortogonalną końcówką sferyczną. Manipulator o takiej konfiguracji stanowi podstawę projektowanego w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu stanowiska badawczego. W oparciu o symulacje numeryczne rozwiązania odwrotnego zadania dynamiki manipulatora dla zadanej trajektorii jego końcówki roboczej przedstawiono wpływ zmiany wybranych wymiarów konstrukcyjnych mechanizmu dźwigniowego (z przekładnią śrubową toczną) napędu ramion równoległoboku na jego wybrane własności kinematyczne i dynamiczne.

¹ Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54. tel: + 48 48 361-71-61, email: zpkm@pr.radom.pl

2. STRUKTURA KINEMATYCZNA MECHANIZMU DŹWIGNIOWEGO NAPĘDU RAMIENIA I PRZEDRAMIENIA MANIPULATORA

Strukturę kinematyczną płaskich mechanizmów dźwigniowych zastosowanych do napędu ramienia i przedramienia manipulatora przedstawiono na rysunku 1. Łańcuch kinematyczny każdego z nich składa się z czterech ogniw ruchomych i podstawy (ostoi), którą stanowi kolumna manipulatora 1. Blok łożyskowania b_2 śruby s_2 przekładni tocznej połączono z ostoją parą kinematyczną obrotową. Nakrętka ns_2 przekładni tocznej z ramieniem 2 manipulatora tworzy także parę kinematyczną obrotową. Ruch obrotowy śruby s_2 realizowany jest za pomocą silnika prądu stałego DC zamocowanego na jej bloku łożyskowym b_2 . Analogicznie zaprojektowano strukturę kinematyczną mechanizmu napędu ogniwa 7 równoległoboku przegubowego 7-8-3-2 realizującego napęd przedramienia 3 manipulatora. Podstawowe wymiary konstrukcyjne równoległoboku przegubowego przyjęto następująco: $l_2 = l_8 = 350 \text{ mm}$ oraz $l_7 = l_{LM} = 150 \text{ mm}$.



Rys. 1. Struktura kinematyczna mechanizmu napędu ramienia i przedramienia manipulatora

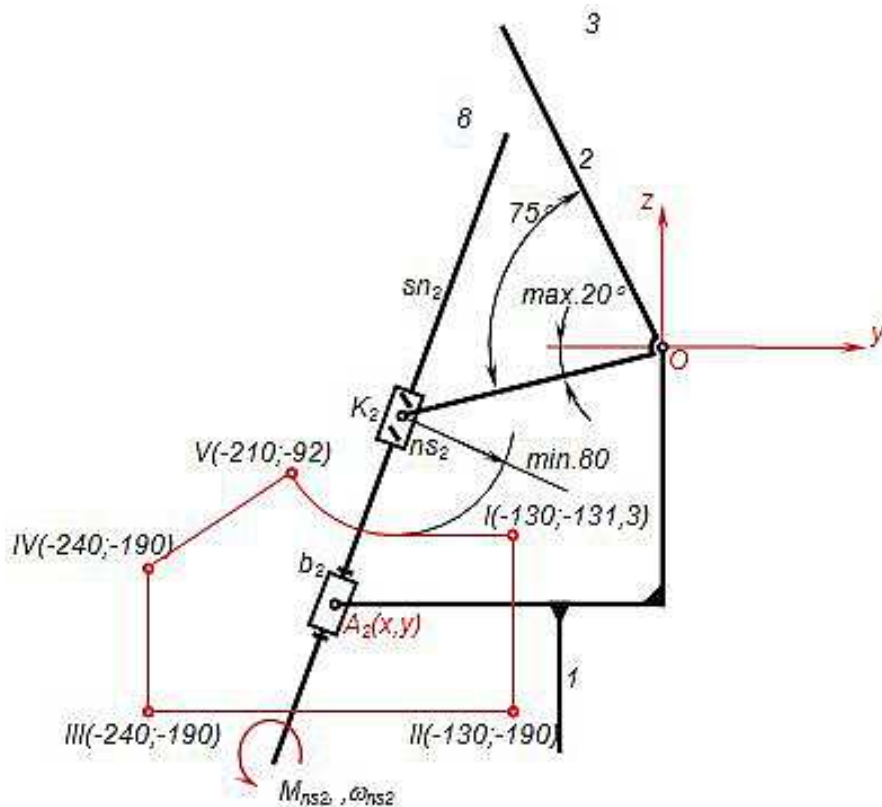
Cechą charakterystyczną układu kinematycznego z przekładnią kulową toczną przy stałej (nieruchomej) osi obrotu śruby, jest stałość jej przełożenia kinematycznego i dynamicznego. Mechanizm dźwigniowy (zawierający w swej strukturze kinematycznej przekładnię śrubową toczną) napędu ramion równoległoboku przegubowego nie zachowuje tej cechy. Jeżeli założyć stałość długości ogniwa 7 oraz wymiaru konstrukcyjnego odcinka OK_2 ogniwa 2, to wartość przełożenia kinematycznego mechanizmu dla każdego punktu trajektorii zmiennej przegubowej ogniwa 2 (tym samym również prędkość kątową ω_2 śruby napędowej s_2) będzie zależeć od położenia osi obrotu bloku łożyskowego b_2 śruby napędowej (od współrzędnych x oraz y punktu A_2). Wartość momentu napędowego M_{ns2} będzie także funkcją położenia punktu A_2 w układzie współrzędnych $O(y, z)$. Położenie osi obrotu obu bloków łożyskowych b_2 i b_7 będzie decydować o własnościach kinematycznych oraz dynamicznych mechanizmów dźwigniowych napędu ramion równoległoboku przegubowego manipulatora.

W celu weryfikacji wpływu wymiarów konstrukcyjnych, związanych z położeniem osi obrotu bloków łożyskowych śrub kulowych, na parametry kinematyczne i dynamiczne mechanizmów napędów ramion równoległoboku przegubowego przeprowadzono ich analizę kinematyczną oraz dynamiczną z wykorzystaniem symulacji numerycznych.

3. SYMULACJE NUMERYCZNE DYNAMIKI ODWROTNEJ MECHANIZMÓW DŹWIGNIOWYCH NAPĘDU RAMION RÓWNOLEGBOKU PRZEGUBOWEGO MANIPULATORA

3.1. Założenia ogólne

W przyjętym do realizacji rozwiązaniu konstrukcyjnym manipulatora założono, że położenie osi obrotu obu bloków łożyskowych względem osi przegubów odpowiednio ogniwi 2 i 7 będzie jednakowe. Ponadto przyjęto równość wymiarów l_7 i OK_2 . Na rysunku 2 przedstawiono obszar możliwych położeni osi obrotu bloków łożyskowych śrub kulowych obu napędów. Jego kształt i współrzędne punktów charakterystycznych zdefiniowano z uwzględnieniem wymiarów konstrukcyjnych zaprojektowanych części i zespołów manipulatora. Wymiary konstrukcyjne oraz parametry inercyjne poszczególnych ogniwi łańcucha kinematycznego manipulatora, niezbędne do opracowania jego matematycznego modelu kinematyki oraz dynamiki, przyjęto na podstawie opracowanych modeli 3D poszczególnych części.

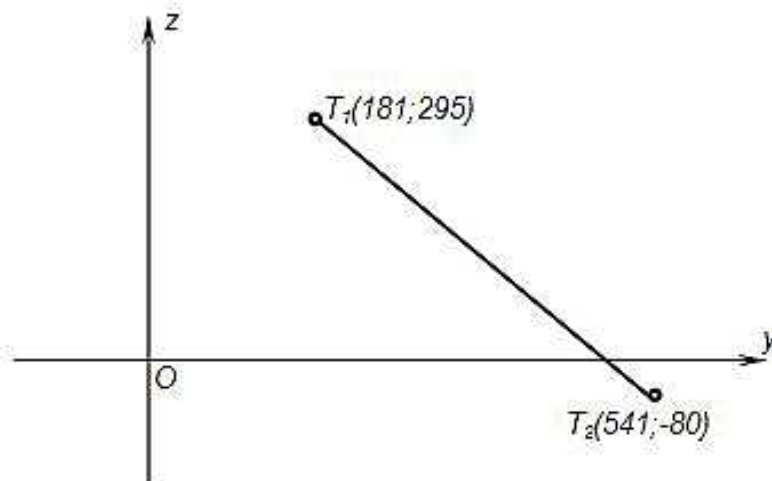


Rys. 2. Zakres położeni osi obrotu bloku łożyskowego śrub kulowych tocznych mechanizmu napędu ramienia i przedramienia manipulatora

3.2. Zdefiniowanie trajektorii końcówki roboczej manipulatora dla potrzeb symulacji numerycznych

Dla potrzeb symulacji numerycznych przyjęto tor geometryczny trajektorii końcówki roboczej manipulatora w postaci odcinka T_1T_2 wyznaczonego w płaszczyźnie ruchu równoległoboku przegubowego manipulatora. Współrzędne jego punktów końcowych podano na rysunku 3. Ich wartości przyjęto tak aby konieczny był ruch ramion równoległoboku przegubowego w całym ich zakresie, dopuszczonym przez założenia konstrukcyjne manipulatora. Takie sformułowanie toru geometrycznego trajektorii końcówki roboczej manipulatora pozwoliło spełnić następujące założenia:

- wyeliminowanie interakcji dynamicznych pomiędzy kolumną manipulatora a ogniwami mechanizmów napędu ramion równoległoboku (kolumna w trakcie realizacji przyjętej trajektorii pozostaje nieruchoma),
- uniknięcie konieczności uwzględnienia w matematycznych modelach kinematyki oraz dynamiki manipulatora zmian wartości wymiarów konstrukcyjnych oraz parametrów inercyjnych kolumny wywołanych zmianą położenia osi obrotu bloków łożyskowych śrub napędowych,
- wymiary konstrukcyjne oraz parametry inercyjne ogniwi ruchomych mechanizmów napędu ramion manipulatora są stałe.



Rys. 3. Tor środka chwytaka jego trajektorii przyjętej do realizacji w symulacjach

Tor geometryczny, w trakcie realizacji każdej z symulacji, parametryzowano funkcją czasu w postaci wielomianu siódmego stopnia gwarantującego ciągłość prędkości, przyspieszeń i uderów oraz zerowe ich wartości w punktach początkowym i końcowym trajektorii końcówki roboczej manipulatora [3,7]. Czas realizacji trajektorii przyjęto równy 3 s. Orientacja chwytaka manipulatora w trakcie realizacji trajektorii była stała. Przyjęto następujące wartości kątów Eulera ZYZ: $\varphi = 270^\circ$, $\nu = 180^\circ$ i $\psi = 0^\circ$.

3.3. Wyniki symulacji numerycznych i ich analiza

Symulacje numeryczne przeprowadzono dla pięciu wariantów położenia osi obrotu bloków łożyskowych śrub napędowych leżących wewnątrz obszaru zdefiniowanego na rysunku 3. Ich współrzędne podano w tabeli 1.

Tab. 1. Współrzędne położenia osi obrotu bloku łożyskowego śruby napędowej dla poszczególnych wariantów symulacji numerycznej

Oznaczenie położenia	Współrzędna y [mm]	Współrzędna z [mm]
A	-170	-144
B	-210	-144
C	-240	-130
D	-240	-184
E	-240	-144

Końcówkę roboczą manipulatora przeprowadzano wzdłuż odcinka T_1T_2 oraz T_2T_1 .

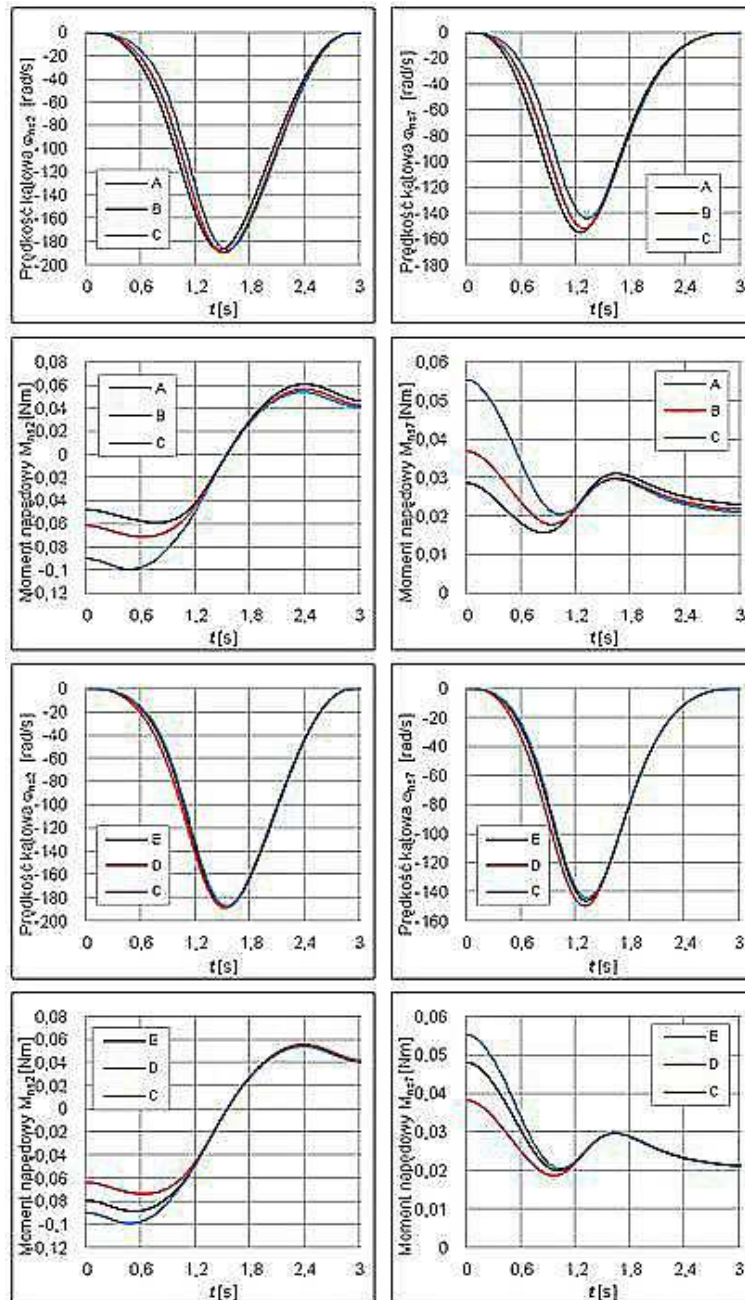
W każdej z symulacji realizowano obliczenia według następującego algorytmu:

1. Dla zadanej trajektorii końcówki roboczej manipulatora rozwiązywano odwrotne zadanie kinematyki manipulatora uzyskując przebiegi czasowe zmiennych przegubowych ich pochodnych (prędkości, przyspieszenia i uderów). Na ich podstawie, stosując metodę iteracyjną, wyznaczano prędkości i przyspieszenia kątowe wszystkich ogniw manipulatora oraz przyspieszenia liniowe ich środków mas. Algorytm rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki manipulatora oparto o metodę Pieppera opisaną w książce [4].
2. Na podstawie wyników rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki manipulatora wyznaczano dla każdego z ogniw siły i momenty bezwładności.
3. Rozwiązanie odwrotnego zadania dynamiki (matematyczny model dynamiki manipulatora sformułowano w oparciu o równania Newtona-Eulera) umożliwiło wyznaczenie reakcji w przegubach manipulatora oraz niezbędnych dla realizacji zadanej trajektorii momentów napędowych.

Symulacje numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem autorskiej aplikacji opracowanej w środowisku programistycznym Delphi 7.

W wyniku przeprowadzenia każdego z wariantów symulacji numerycznej uzyskiwano:

- charakterystyki kinematyczne (przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń i uderów) środka kiści, środka chwytaka oraz wszystkich zmiennych przegubowych,
- charakterystyki dynamiczne (przebiegi składowych reakcji oraz momentów) dla wszystkich przegubów manipulatora.

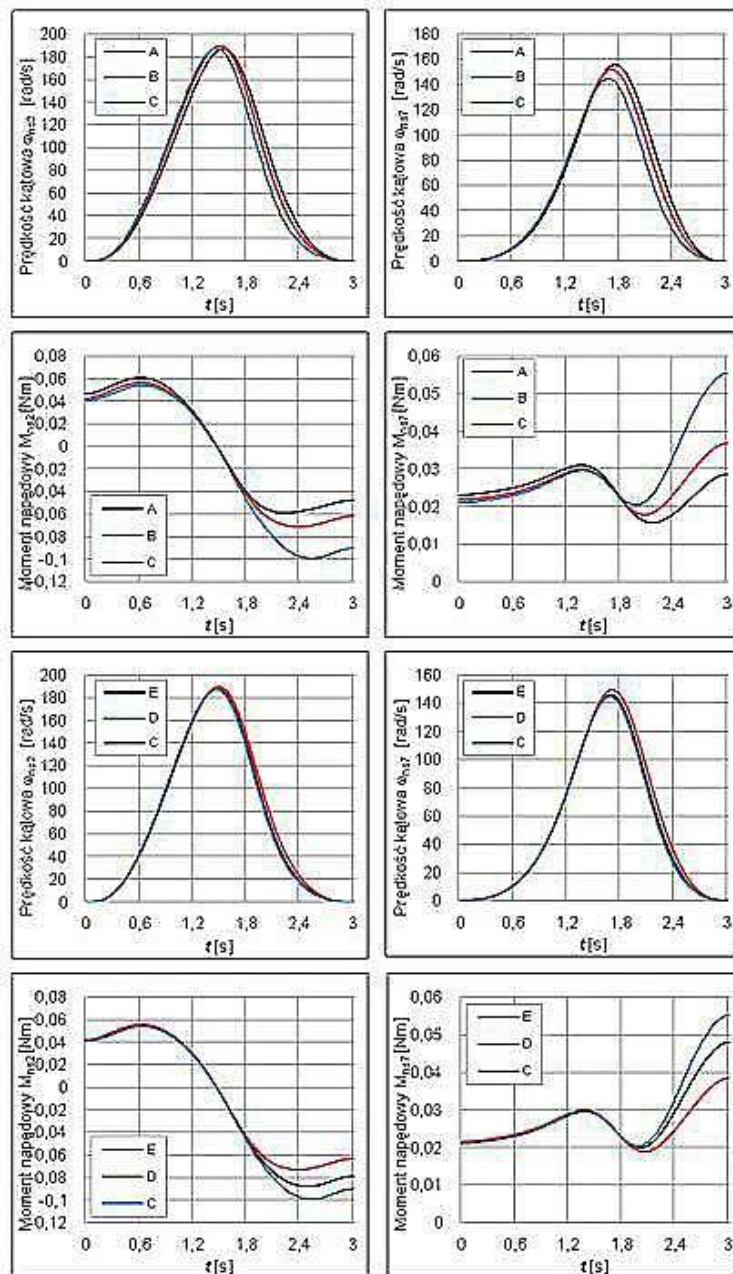


Rys. 4. Przebiegi prędkości kątowej śruby kulowej napędowej oraz wymaganych momentów napędowych, dla realizacji trajektorii T_1T_2 , obu mechanizmów napędu ramion równoległoboku przegubowego

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi prędkości kątowej śruby kulowej napędowej s_2 i s_7 oraz momentów napędowych M_{ns2} i M_{ns7} niezbędnych dla realizacji zadanej trajektorii T_1T_2 dla przyjętych wariantów położenia osi obrotu bloków łożyskowych śrub kulowych tocznych obu mechanizmów napędu ramion równoległoboku przegubowego manipulatora. Ich analiza wskazuje na znaczne zmiany wartości wymaganego momentu napędowego śruby tocznej, szczególnie w początkowej fazie trajektorii. Najniższymi wartościami wymaganego momentu napędowego uzyskano dla osi obrotu bloku łożyskowego śruby napędowej położonego w punkcie A. Przyjmując go jako bazowy można zauważyć, że zwiększenie odległości (wzrost wartości bezwzględnej współrzędnej y przy stałej wartości współrzędnej z) osi obrotu bloku łożyskowego od osi obrotu ramion równoległoboku

boku przegubowego prowadzi do znacznego wzrostu momentu napędowego śruby toczonej (wariant B i E). Zwiększenie tej odległości poprzez wzrost wartości bezwzględnej współrzędnej z przy stałej wartości współrzędnej y (warianty C, D i E), prowadzi do zmniejszenia momentu napędowego śruby toczonej. Jednocześnie, dla położeń, w których występuje zwiększenie wartości wymaganego momentu napędowego śruby toczonej obserwuje się zmniejszenie jej prędkości obrotowej.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi prędkości kątowej śruby kulowej napędowej s_2 i s_7 oraz momentów napędowych M_{ns2} i M_{ns7} niezbędnych dla realizacji zadanej trajektorii T_2T_1 (ruch końcówki roboczej odbywa się od punktu T_2 do punktu T_1). Analiza tych przebiegów prowadzi do analogicznych wniosków jak w przypadku ruchu końcówki roboczej od punktu T_1 do punktu T_2 .



Rys. 5. Przebiegi prędkości kątowej śruby kulowej napędowej oraz wymaganych momentów napędowych, dla realizacji trajektorii T_2T_1 , obu mechanizmów napędu ramion równoległoboku przegubowego

4. WNIOSKI

1. Analiza przebiegów momentów napędowych, niezbędnych do realizacji zadanej trajektorii końcówki roboczej manipulatora, wskazuje na dużą ich zależność od położenia osi obrotu bloków łożyskowych śruby kulowej przekładni tocznej.
2. Zwiększenie odległości osi obrotu bloku łożyskowego śruby od osi obrotu ramion równoległoboku przegubowego powoduje wzrost wymaganego momentu napędowego.
3. Wyznaczenie wymiarów konstrukcyjnych, określających położenie osi obrotu bloku łożyskowego śruby kulowej tocznej, powinno być celem syntezy optymalnej mechanizmu dźwigniowego napędu ramion równoległoboku przegubowego.
4. Rozwiązania wymaga problem wyboru kryterium optymalizacyjnego (funkcji celu) takiej syntezy.
5. Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych wskazują na niewielką przydatność pracy mechanicznej sił napędowych wyznaczonej w przestrzeni zmiennych przegubowych. Z analizy uzyskanych charakterystyk kinematycznych i dynamicznych wynika, że wzrostowi wymaganych momentów napędowych towarzyszy na ogół zmniejszenie prędkości kątowej śruby napędowej.
6. Można przyjąć tezę, że poprawnym kryterium optymalizacyjnym może być minimalizacja zużycia energii elektrycznej przez silniki napędowe, zdecydowanie silniej zależnego od momentu obciążającego wał silnika niż od jego prędkości kątowej. Wymaga to opracowania odpowiednich algorytmów optymalizacyjnych i dalszych badań.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Gruszka P., Maciąg P., Markiewicz A.: *Kształtowanie własności dynamicznych płaskiego równoległoboku przegubowego o dwóch stopniach swobody poprzez zmianę parametrów inercyjnych jego ogniw*. TTS Technika transportu szynowego, 2013, 10, 797-805.
- [2] Sobolewski J.Z.: *Przekładnie śrubowe kulkowe*. WNT, Warszawa 2009.
- [3] Gruszka P.: *Kształtowanie własności kinematycznych trajektorii manipulatora we współrzędnych kartezjańskich*. Mechanik, 2012, nr 1.
- [4] Craig J. J.: *Wprowadzenie do robotyki*. WNT, Warszawa 1995.
- [5] Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W.: *Modelowanie i sterowanie robotów*. PWN, Warszawa 2003.
- [6] Spong M. W., Vidyasagar M.: *Dynamika i sterowanie robotów*. WNT, Warszawa 1997.
- [7] Olędzki A.: *Mechanizmy krzywkowe*. WNT, Warszawa 1966.