

ANALIZA OBCIĄŻEŃ JEDNOSTEK NAPĘDOWYCH DLA PRZESTRZENNYCH RUCHÓW AGROROBOTA

Andrzej Graboś, Marek Boryga

Katedra Podstaw Techniki, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Streszczenie. W pracy przedstawiono sposób modelowania oraz wyniki komputerowej symulacji ruchu agrorobota, dla trzech różnych trajektorii ruchu. Badania symulacyjne, dla trzech wybranych torów ruchu chwytaka, przeprowadzono w programie Matlab (Simulink). Wyznaczono maksymalne wartości składowych momentów napędowych poszczególnych ogniw łańcucha kinematycznego i przedstawiono w postaci wykresów.

Słowa kluczowe: agrorobot, moment napędowy, równanie ruchu, kinematyka, dynamika, komputerowa symulacja ruchu

Wstęp

Układy empiryczne można analizować według różnych interesujących badacza kryteriów i zjawisk. Dla każdego układu empirycznego można budować różne modele, zależne od przyjętego sposobu opisu, założeń i zastosowanych uproszczeń. Najistotniejszym kryterium przy doborze modelu jest uwzględnienie tych właściwości układu rzeczywistego, które w rozważanym przypadku mają decydujący wpływ na analizowane zjawisko. Wnikliwość z jaką wprowadzane są uproszczenia ma zasadniczy wpływ na uzyskane wyniki analizy. Przyjęcie zbyt dużych uproszczeń może spowodować pominięcie istotnych cech układu rzeczywistego, natomiast nadmierna złożoność modelu prowadzi zazwyczaj do skomplikowanego opisu matematycznego, zwiększenia czasu obliczeń itd.

W maszynach wolnobieżnych siły bezwładności są często małe w porównaniu z siłami zewnętrznymi. Z tego względu można je niekiedy pominąć i rozważać z pomocą metod statyki równowagę sił działających na ogniwa robocze.

W przypadku manipulacyjnych maszyn rolniczych, od których wymagana jest zarówno precyzja ruchu jak i duża wydajność, zasadne jest przeprowadzenie analizy pozwalającej na oszacowanie udziałów poszczególnych składowych sił i momentów występujących w równaniach ruchu.

Celem pracy jest wyznaczenie maksymalnych wartości poszczególnych składowych momentów (związanych z działaniem sił bezwładności, odśrodkowych, Coriolisa i ciężkości) w momentach napędowych ogniw agrorobota w czasie ruchu po zadanych trajektoriach.

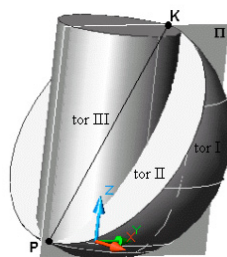
Dla różnych torów ruchu można oczekiwać innych udziałów poszczególnych składowych momentów, stąd też rozpatrzono ruch po sferze (tor I), po powierzchni walcowej (tor II) oraz po prostej (tor III) jako charakterystycznych dla zbioru owoców (rys. 1).

W każdym przypadku planowana trajektoria wymuszała ruch we wszystkich parach kinematycznych łańcucha pozycjonowania agrorobota.

W celu wyznaczenia maksymalnych wartości poszczególnych składowych momentów zbudowano matematyczny model dynamiki zespołu pozycjonowania agrorobota. Budowa tego modelu wymagała:

- rozwiązania prostego zadania kinematyki,
- rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki,
- wyznaczenia energii kinetycznej i potencjalnej poszczególnych ogniw, a następnie wykorzystania równań Lagrange'a II rodzaju do wyprowadzenia różniczkowych równań ruchu ogniw.

Wyznaczone równania ruchu rozwiązano na drodze numerycznej wykorzystując środowisko Matlab (Simulink). Wyniki przedstawiono w postaci wykresów maksymalnych wartości składowych momentu napędowego ogniw agrorobota.



Źródło: rysunek własny autorów

Rys. 1. Położenie prostej i powierzchni po których zaplanowano ruch

Fig. 1. Position of straight line and surface, on which the movement is planned to take place

Metodyka

Obiektem badań był zespół pozycjonowania agrorobota o trzech stopniach swobody w którym oś pierwszej pary jest pionowa, natomiast dwie kolejne są wzajemnie równoległe i prostopadłe do pierwszej. Struktura taka umożliwia realizację ruchów przestrzennych.

Korzystając z notacji Denavita-Hartenberga [Craig 1989] wprowadzono układy współrzędnych związane z ogniwami oraz podstawą łańcucha kinematycznego, a następnie wyznaczono:

- macierze przekształceń pomiędzy poszczególnymi układami współrzędnych,
- wektory położenia środków mas poszczególnych ogniw w układzie podstawy,
- współrzędne wektorów prędkości środków mas ogniw, w układzie współrzędnych związanym z podstawą,
- prędkości kątowe ogniw względem układów współrzędnych, których początki leżą w środkach mas ogniw, a osie są równoległe do odpowiednich osi układów współrzędnych związanych z ogniwami.

Wykorzystując uzyskane zależności wyprowadzono równania ruchu zespołu pozycjonowania agroboty:

$$\ddot{\theta}_1 d_{111} - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 d_{121} - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 d_{131} = M_1(t) \quad (1)$$

$$\ddot{\theta}_2 d_{222} + \ddot{\theta}_3 d_{332} + \dot{\theta}_1^2 d_{121} - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 d_{232} - \dot{\theta}_3^2 d_{232} + M_{2st} = M_2(t) \quad (2)$$

$$\ddot{\theta}_3 d_{333} + \ddot{\theta}_2 d_{332} + \dot{\theta}_1^2 d_{131} + \dot{\theta}_2^2 d_{223} + M_{3st} = M_3(t) \quad (3)$$

Współczynniki występujące w równaniach (1,2,3) dane są zależnościami:

$$d_{111} = J_{Y1} + J_{Y2}c_2^2 + J_{Y3}c_{23}^2 + \frac{1}{4}m_2l_2^2c_2^2 + m_3\left(l_2^2c_2^2 + l_2l_3c_2c_{23} + \frac{1}{4}l_3^2c_{23}^2\right)$$

$$d_{121} = J_{Y2}s_2c_2 + J_{Y3}s_{23}c_{23} + \frac{1}{4}m_2l_2^2s_2c_2 + m_3\left(l_2^2s_2c_2 + \frac{l_2l_3}{2}(s_2c_{23} + c_2s_{23}) + \frac{1}{4}l_3^2s_{23}c_{23}\right)$$

$$d_{131} = J_{Y3}s_{23}c_{23} + m_3\left(\frac{l_2l_3}{2}c_2c_{23} + \frac{1}{4}l_3^2s_{23}c_{23}\right)$$

$$d_{222} = J_{Z2} + J_{Z3} + m_2\frac{l_2^2}{4} + m_3\left(l_2^2 + l_2l_3c_3 + \frac{l_3^2}{4}\right)$$

$$d_{332} = J_{Z3} + m_3\left(\frac{l_2l_3}{2}c_3 + \frac{l_3^2}{4}\right), \quad d_{232} = d_{223} = m_3\frac{l_2l_3}{2}s_3, \quad d_{333} = m_3\frac{l_3^2}{4} + J_{Z3}$$

$$M_{2st} = \left[m_2\frac{l_2}{2}c_2 + m_3\left(\frac{l_3}{2}c_{23} + l_2c_2\right)\right]g, \quad M_{3st} = m_3\frac{l_3}{2}c_{23}g$$

gdzie:

- λ_1, l_2, l_3 – długości poszczególnych ogniw [m],
- λ_1, l_2, l_3 – długości poszczególnych ogniw [m],
- θ_i – względne przemieszczenie kątowe ogniw [rad],
- A_i – macierz przekształcenia układów współrzędnych,
- s_i, c_i, s_{ij}, c_{ij} – oznaczenia funkcji trygonometrycznych sinus i cosinus kąta θ_i oraz sumy kątów θ_i i θ_j ,
- m_i – masy poszczególnych ogniw [kg],
- $J_{Z2}, J_{Z3}, J_{Y2}, J_{Y3}$ – masowe momenty bezwładności ogniw [kg·m²],
- d_{ijk} – współczynniki bezwładności i symbole Christoffela [kg·m²],
- M_{ist} – moment statyczny obciążający ogniwo i [N·m],
- $M_i(t)$ – moment napędowy [N·m].

Po wprowadzeniu nowych oznaczeń poszczególnych składowych momentów, równania ruchu przyjmują postać:

$$\sum_{i=1}^3 M_{1i} = M_1(t) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^6 M_{2i} = M_2(t) \quad (5)$$

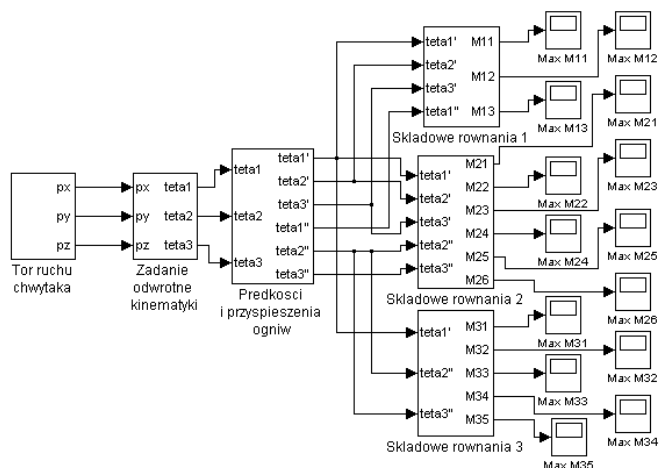
$$\sum_{i=1}^5 M_{3i} = M_3(t) \quad (6)$$

gdzie:

M_{ij} – składowe momentów poszczególnych równań ruchu [N·m].

Badania symulacyjne, których celem było wyznaczenie maksymalnych wartości poszczególnych składowych momentów w równaniach ruchu (wzór nr 4, 5, 6) przeprowadzono w programie Matlab (Simulink). Program podzielono na moduły (rys. 2) w których zadawane lub wyznaczane są kolejno:

- tor ruchu chwytaka,
- współrzędne konfiguracyjne ogniów w funkcji położenia chwytaka,
- prędkości i przyspieszenia ogniów,
- rzeczywiste charakterystyki ruchu ogniów z uwzględnieniem podatności i tłumienia w układach napędowych,
- realizowane (rzeczywiste) położenia chwytaka na podstawie rzeczywistych charakterystyk ruchu,
- maksymalne wartości poszczególnych składowych momentów w równaniach ruchu.



Źródło: schemat własny autorów

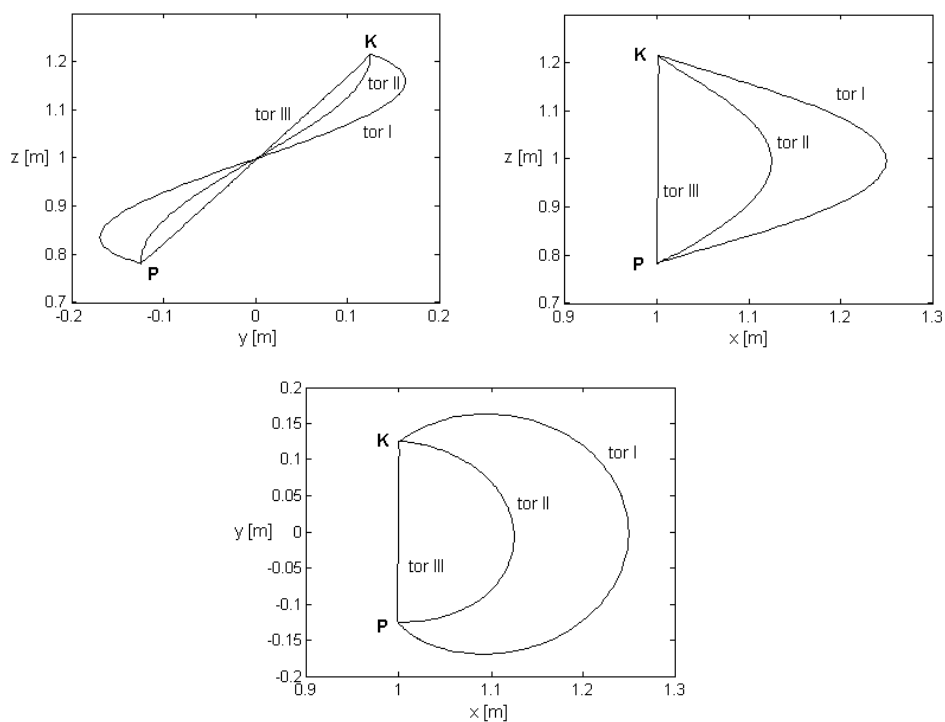
Rys. 2. Schemat programu w środowisku Matlab (Simulink)
 Fig. 2. Diagram of the program in the Matlab (Simulink) environment

Wyniki badań i ich analiza

Dla realizowanych torów ruchu chwytaka, przedstawionych w postaci rzutów prostokątnych (rys. 3), maksymalne wartości poszczególnych składowych momentów napędowych przedstawiają rysunki 4, 5 i 6.

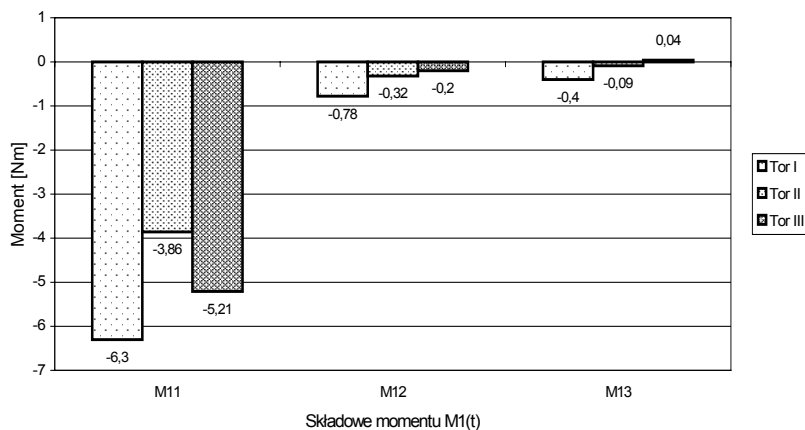
W przypadku ogniwa pierwszego największy udział w momencie napędowym stanowi moment wynikający z działania sił bezwładności M_{11} . Momenty wynikające z działania siły Coriolisa M_{12} i M_{13} stanowią około 10% momentu M_{11} .

W przypadku ogniwa drugiego i trzeciego dominujący udział w momentach napędowych stanowią momenty statyczne M_{26} i M_{34} wynikające z działania siły grawitacji. Nieco mniejsze wartości osiągają momenty M_{21} i M_{31} wynikające z działania sił bezwładności. Momenty uwzględniające wpływ bezwładności ogniw sąsiednich na dane tzn. M_{22} i M_{32} stanowią jeszcze mniejszy udział. Poniżej 1% w stosunku do momentów statycznych osiągają zarówno momenty pochodzące od sił odśrodkowych M_{23} , M_{25} , M_{33} i M_{34} jak i od sił Coriolisa M_{24} , jednakże w stosunku do momentów pochodzących od sił bezwładności momenty te stanowią udział rzędu 10 %.



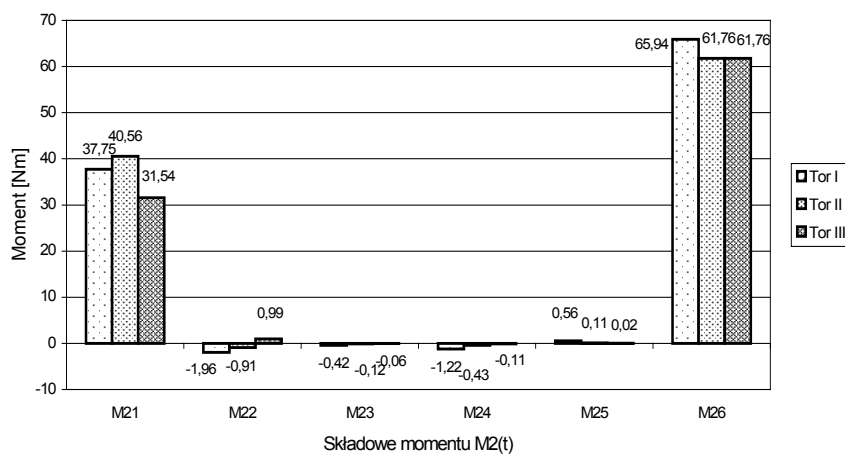
Źródło: Na podstawie obliczeń własnych autorów

Rys. 3. Rzuty prostokątne realizowanych torów ruchu chwytaka
 Fig. 3. Orthogonal projections of executed gripping device movement paths



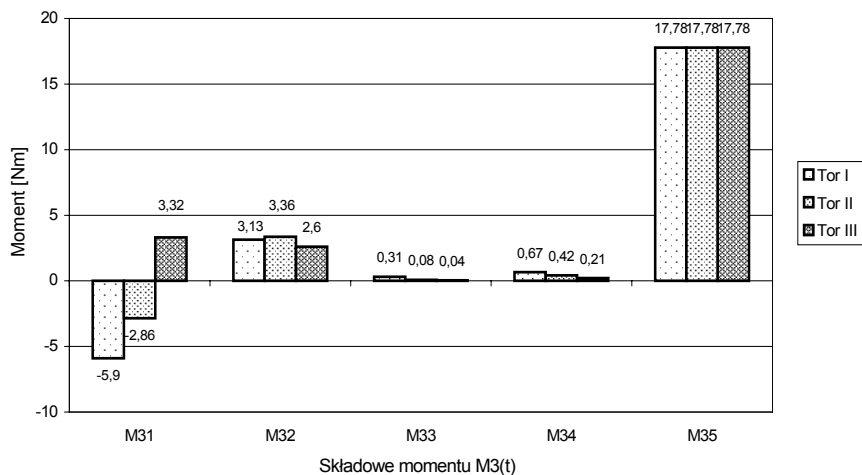
Źródło: na podstawie obliczeń własnych autorów

Rys. 4. Wartości składowych momentu napędowego pierwszego ogniwa
 Fig. 4. Values of driving torque components for the first element



Źródło: na podstawie obliczeń własnych autorów

Rys. 5. Wartości składowych momentu napędowego drugiego ogniwa
 Fig. 5. Values of driving torque components for the second element



Źródło: na podstawie obliczeń własnych autorów

Rys. 6. Wartości składowych momentu napędowego trzeciego ogniwa
 Fig. 6. Values of driving torque components for the third element

Wnioski

1. Chociaż dominującą rolę w momentach napędowych poszczególnych ogniw stanowią momenty statyczne i momenty pochodzące od sił bezwładności to w przypadku maszyn precyzyjnych (agrorobotów) konieczne jest uwzględnienie wszystkich składowych momentów napędowych, także tych pochodzących od sił Coriolisa i sił odśrodkowych. Momenty te wpływają na dokładność pozycjonowania co jest jednym z podstawowych kryteriów oceny pracy agrorobota.
2. Niezależnie od przyjętego toru ruchu maksymalne wartości poszczególnych składowych momentów napędowych osiągają zbliżone wartości. Ich różnice wynikają zarówno z różnych położen ogniw agrorobota w czasie ruchu po zadanych torach jak i z przyjętych prędkości i kątowych przyspieszeń ogniw.

Bibliografia

Craig J.J. 1989. Wprowadzenie do robotyki. Warszawa. WNT. ISBN 8320415896.

THE ANALYSIS OF LOADS EXERTED ON DRIVE UNITS FOR THREE-DIMENSIONAL AGROROBOT MOVEMENTS

Abstract. The paper presents the modelling method and the results of agrorobot movement simulation by computer, for three different motion trajectories. Simulation tests for three selected paths of gripping device movement were performed using the Matlab (Simulink) application. The researchers determined maximum values of driving torque components for individual kinematic chain elements and presented them in form of diagrams.

Key words: agrorobot, driving torque, motion equation, kinematics, dynamics, movement simulation by computer

Adres do korespondencji:

Andrzej Graboś; e-mail: andrzej.grabos@ar.lublin.pl

Katedra Podstaw Techniki

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ul. Doświadczalna 50A

20-280 Lublin