

MODELOWANIE KINEMATYKI GAŚNIENICOWEGO ROBOTA INSPEKCYJNEGO W OPROGRAMOWANIU AMESIM

Józef Giergiel¹, Krzysztof Kurc², Dariusz Szybicki³,
Piotr Małka⁴

Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki, Politechnika Rzeszowska; Katedra Robotyki i Mechatroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza

e-mail: bartek@prz.edu.pl¹, kkurc@prz.edu.pl², dszybicki@prz.edu.pl³, malka@agh.edu.pl⁴

Streszczenie

W pracy zaprezentowano model matematyczny kinematyki gaśienicy i całego układu napędowego budowanego gaśienicowego robota inspekcyjnego. Przedstawiono rozwiązanie zadania prostego i odwrotnego kinematyki z uwzględnieniem poślizgu gaśienicy. Dla otrzymanych modeli wykonano symulacje w oprogramowaniu AMESim przeznaczonym do modelowania wielodyscyplinowych systemów mechatronicznych. Zbudowano cały system napędowy robota wraz z silnikiem, układem występujących tam przekładni, uproszczonym modelem CAD robota oraz środowiska jego pracy.

Słowa kluczowe: roboty gaśienicowe, roboty inspekcyjne, modelowanie, kinematyka, symulacje

KINEMATICS MODELING INSPECTION ROBOT WITH CRAWLER DRIVE IN AMESIM SOFTWARE

Summary

The paper presents a mathematical model and the kinematics of caterpillar drive system built caterpillar inspection robot. In the AMESim program modeled previously received the simple and inverse task kinematics. For the obtained models made simulation in AMESim software designed for multidisciplinary modeling of mechatronic systems. Built the robot's drive system, with the engine, transmission system occurring there, a simplified CAD model of the robot and its working environment.

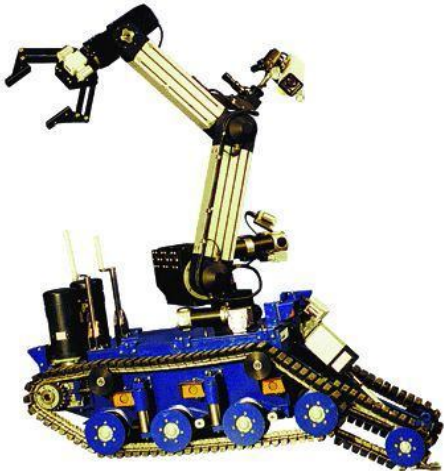
Keywords: robots with crawler drive, inspection robots, modeling, kinematics, simulations

1. WSTĘP

Napęd gaśienicowy jest mechanizmem umożliwiającym poruszanie różnego typu pojazdów w terenie za pomocą gaśienic. Zalety tego napędu pozwalają wyposażonym w niego pojazdom na pokonywanie trudnych przeszkód terenowych, ograniczając ich grzęźnięcie i poślizg [1,3]. Gaśienice zwiększają powierzchnię styku pojazdu z podłożem oraz umożliwiają pokonywanie wzniesień o względnie dużej wartości kąta nachylenia.

Zastosowanie tego typu napędu zmniejsza opory toczenia w nieutwardzonym terenie, zmniejsza również naciski jednostkowe wywierane na grunt oraz przyczynia się do zwiększenia możliwości operowania pojazdu w zmiennych warunkach[2,4]. Oprócz zalet ten rodzaj napędu posiada również wady. Zaliczyć do nich można duże opory tarcia, małą trwałość oraz dużą masę w przypadku gaśienic metalowych. Zastosowanie tego typu

gąsienic powoduje również niszczenie nawierzchni utwardzonych, np. asfaltowych. W analizowanym robocie gąsienice wykonane są z gumy, co powoduje zmniejszenie ich masy oraz ogranicza niszczenie nawierzchni. Wymienione cechy napędu gąsienicowego powodują, że jest on często stosowany w robotach inspekcyjnych. Głównym zadaniem robotów inspekcyjnych jest zastępowanie człowieka w badaniach miejsc niebezpiecznych lub niedostępnych dla człowieka. W środowisku pracy robotów inspekcyjnych często występują przeszkody terenu, niespoiste nieutwardzone podłoże oraz znaczne nachylenie powierzchni, dlatego celowe jest stosowanie tu napędu gąsienicowego. Obecnie dużo robotów gąsienicowych ma zastosowanie inspekcyjne. Przykładem takiego robota jest np. INSPECTOR SR-11 (rys.1) zaprojektowany i wyprodukowany przez Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów (PIAP) z myślą o szeroko pojętych zastosowaniach inspekcyjnych, wliczając w to patrolowanie terenów, wykrywanie i neutralizację ładunków wybuchowych[9].



Rys.1. Robot INSPECTOR SR-11[9]

Innym interesującym przykładem robota gąsienicowego jest Chaos High Mobility Robot (rys.2).



Rys.2. Robot Chaos High Mobility[10]

Składa się on z czterech niezależnie sterowanych gąsienic. Jego nietypowa konstrukcja umożliwia wspinanie się po terenie, który dla innych robotów tej wielkości jest całkowicie niedostępny[10]. Może poruszać się m.in. po schodach, szynach kolejowych, żwirze i rumowiskach.

Był przetestowany w akcji ratowniczej przeprowadzonej w ośrodku szkoleniowym Disaster City w Teksasie, gdzie potwierdził ogromną przydatność i niezawodność w niedostępnym terenie.

2. SZYBKIE PROTOTYPOWANIE ROBOTA

Na poruszającego się w terenie robota gąsienicowego działają, zmienne w czasie, różnego typu czynniki. Do analizy ruchu takiego pojazdu bardzo pomocne są modele i symulacje komputerowe [5]. Szybkie prototypowanie kinetyki robotów skraca czas projektowania, pozwala na szybkie wprowadzanie niezbędnych poprawek oraz umożliwia ocenę właściwości przyjętego modelu[7,8]. Niezbędny w modelowaniu i symulacjach opis matematyczny ruchu poszczególnych elementów gąsienicy jest na tyle złożony, że konieczne jest stosowanie modeli uproszczonych. W modelowaniu i symulacjach wykonanych dla budowanego robota inspekcyjnego założono, że gąsienica traktowana będzie jako rozpięta na kołach napinających oraz napędowym nierozciągliwa taśma.

Dla przyjętego rozwiązania układu napędowego robota zbudowano w oprogramowaniu AMESim jego model wirtualny. Za pomocą równań zadania prostego oraz odwrotnego kinematyki zasymulowano przemieszczanie geometrycznego środka robota przy założonych poślizgach gąsienic. Przeprowadzone wirtualne prototypowanie pozwoliło na wyznaczenie przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń elementów układu gąsienicowego oraz całego robota. Zasymulowano zachowanie modelu robota przy różnych poślizgach gąsienic, stratach przekładni, parametrach pracy silników oraz przy zmiennych warunkach środowiska pracy.

2.1. PRZYJĘTY MODEL ROBOTA

Wirtualne zamodelowanie robota (rys.3) wymagało opisanego jego ruchu za pomocą równań zadania prostego kinematyki:

$$\dot{x}_C = \frac{r\dot{\alpha}_1(1-s_1) + r\dot{\alpha}_2(1-s_2)}{2} \cos \beta \quad (1)$$

$$\dot{y}_C = \frac{r\dot{\alpha}_1(1-s_1) + r\dot{\alpha}_2(1-s_2)}{2} \sin \beta \quad (2)$$

$$\dot{\beta} = \frac{r\dot{\alpha}_2(1-s_2) - r\dot{\alpha}_1(1-s_1)}{H} \quad (3)$$

gdzie:

x_C, y_C - współrzędne środka robota,

α_1, α_2 - kąty obrotu kół napędowych,

s_1, s_2 - poślizgi poszczególnych gąsienic,

r - promień koła napędowego,

H - odległość pomiędzy osiami gaśienic,
 β - kąt obrotu ramy robota.

Zjawisko poślizgu pojawia się wówczas, gdy występuje przemieszczanie nośnego odcinka gaśienicy względem podłoża. Na poślizg gaśienicy wpływają głównie następujące czynniki:

- własności podłoża;
- występująca siła napędowa;
- typ i rozlokowanie szponów na gaśienicy.

W przypadku, gdy robot porusza się po podłożu o małym współczynniku oporu toczenia i dużej spistości, reakcja styczna w szponie jest w przybliżeniu równa oporowi toczenia. W takich warunkach poślizg gaśienicy nie występuje lub jest bardzo mały. Podczas ruchu po podłożu o dużym współczynniku toczenia i małej spistości reakcje styczne podłoża przenoszą również pozostałe szpony znajdujące się w podłożu i występują jednorazowe poziome odkształcenia podłoża. Na podstawie pozycji literaturowych [1,4] oraz pracy [6] poślizg gaśienicy zamodelowano jako:

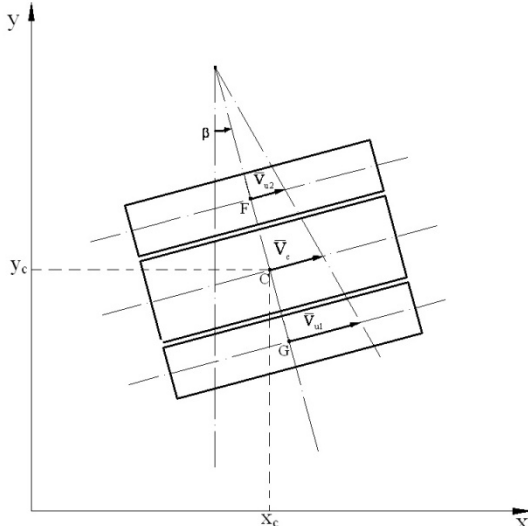
$$s_i = \frac{(n-1)\Delta l_i'}{L} \quad (4)$$

gdzie;

L - długość odcinka nośnego gaśienicy,

n - ilość szponów w kontakcie z podłożem;

$\Delta l_i'$ - jednorazowe poziome odkształcenie podłoża lub szponu.



Rys.3. Schemat obrotu ramy robota o kąt β

Otrzymano również równania będące rozwiązaniem zadania odwrotnego kinematyki:

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{V_C - 0,5\beta H}{r(1-s_1)} \quad (5)$$

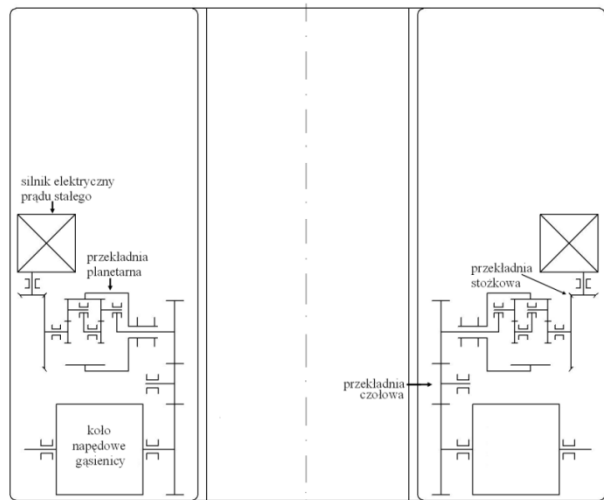
$$\dot{\alpha}_2 = \frac{V_C + 0,5\beta H}{r(1-s_2)} \quad (6)$$

$$V_C = \sqrt{\dot{x}_C^2 + \dot{y}_C^2} \quad (7)$$

Do wykonania symulacji ruchu robota (rys.4) niezbędny okazał się opis kinematyki gaśienicowego modułu napędowego zbudowanego z:

- silnika prądu stałego,
- przekładni stożkowej,
- przekładni planetarnej,
- przekładni czołowej.

Wyznaczono niezbędne w modelowaniu parametry zastosowanego silnika prądu stałego, układu przekładni oraz wymiary charakterystyczne robota.



Rys.4. Schemat robota gaśienicowego z układem przeniesienia napędu

Zastosowane tu elementy układu napędowego powodują, że znamionowa prędkość obrotowa na silniku $n_s=3000$ obr/min, poprzez zastosowany układ przekładni zostaje zredukowana 72 razy do prędkości na kole napędowym gaśienicy wynoszącej $n_g= 42$ obr/min.

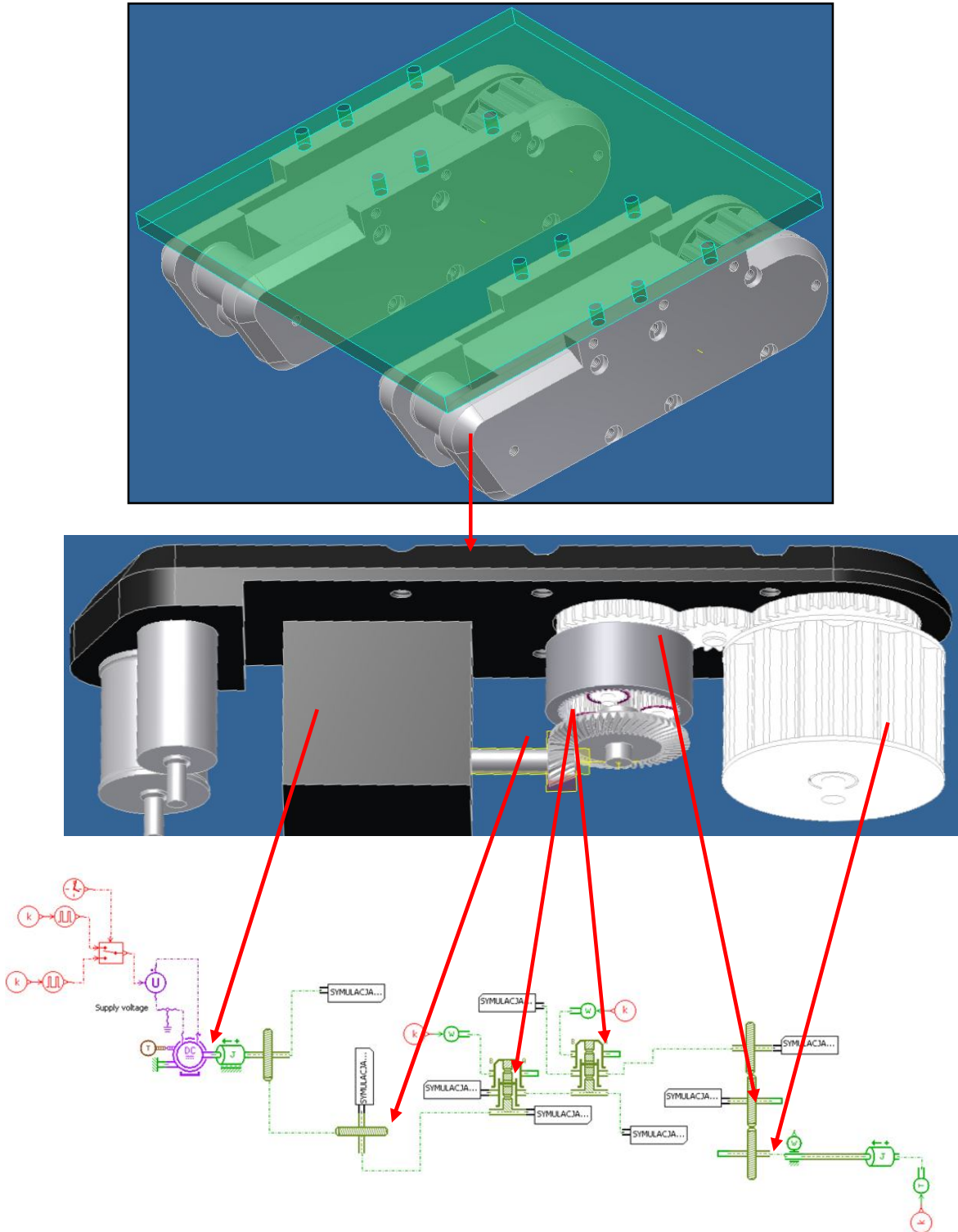
Przyjęte w modelu robota zależności matematyczne pozwoliły na jego szybkie prototypowanie w środowisku AMESim oraz umożliwiły wykonanie różnego typu symulacji.

2.2. PROTOTYPOWANIE ROBOTA W ŚRODOWISKU AMESIM

LMS Imagine Lab AMESim jest to kompletny system do symulacji wielodzielnych systemów mechatronicznych. Pozwala na rozwiązywanie wielu problemów inżynierskich już we wczesnej fazie projektowania. Zastosowanie do prototypowania oprogramowania AMESim umożliwiło zaprojektowanie i ocenę parametrów analizowanego robota bez potrzeby budowy rzeczywistych modeli. Możliwe okazało się wprowadzenie szybkich modyfikacji przyjętych rozwiązań oraz symulacja ich działania w zmiennych warunkach.

W AMESim wykonano model układu napędowego (rys.5) wraz z występującymi tam przekładniami, silnikiem, prostym modelem CAD robota oraz jego środowiska pracy. Zamodelowanie robota oraz jego otoczenia w postaci obiektów CAD miało na celu graficzne przedstawienie ruchu robota po zadanej trajektorii oraz wizuali-

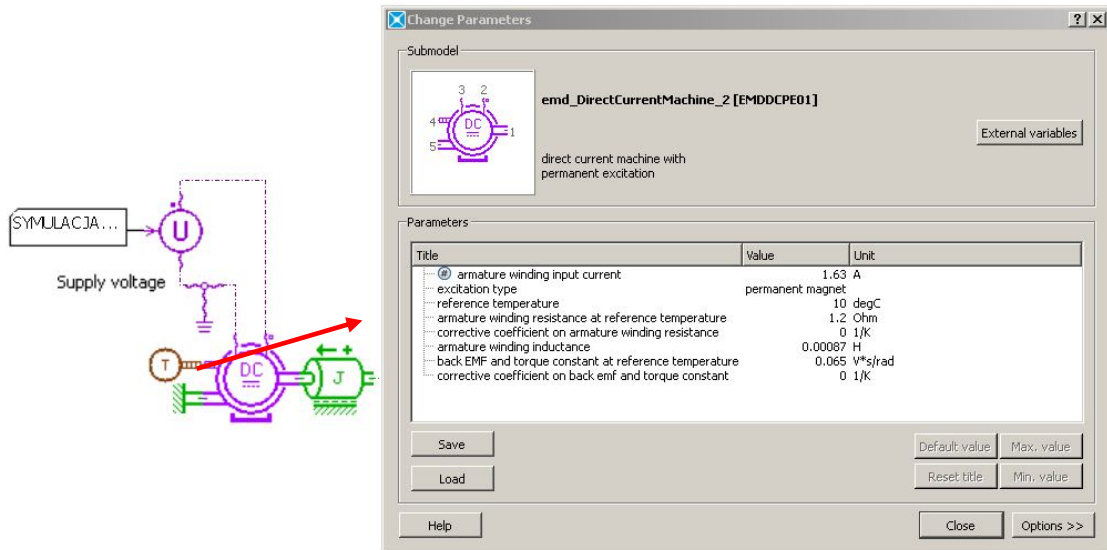
zację zmian parametrów ruchu. Model CAD robota okazał się niezbędny podczas opisu dynamiki, dzięki niemu wyznaczono masy oraz masowe momenty bezwładności opisywanego obiektu. Symulacje dynamiki w oprogramowaniu AMESim będą przedmiotem dalszych publikacji.



Rys.5. Model pojedynczego układu przeniesienia napędu robota

W symulacjach przyjmowano różne parametry charakteryzujące elementy układu napędowego. Możliwe było określenie takich wielkości charakteryzujących silniki napędowe (rys.6) jak: napięcie zasilania, wartość prądu

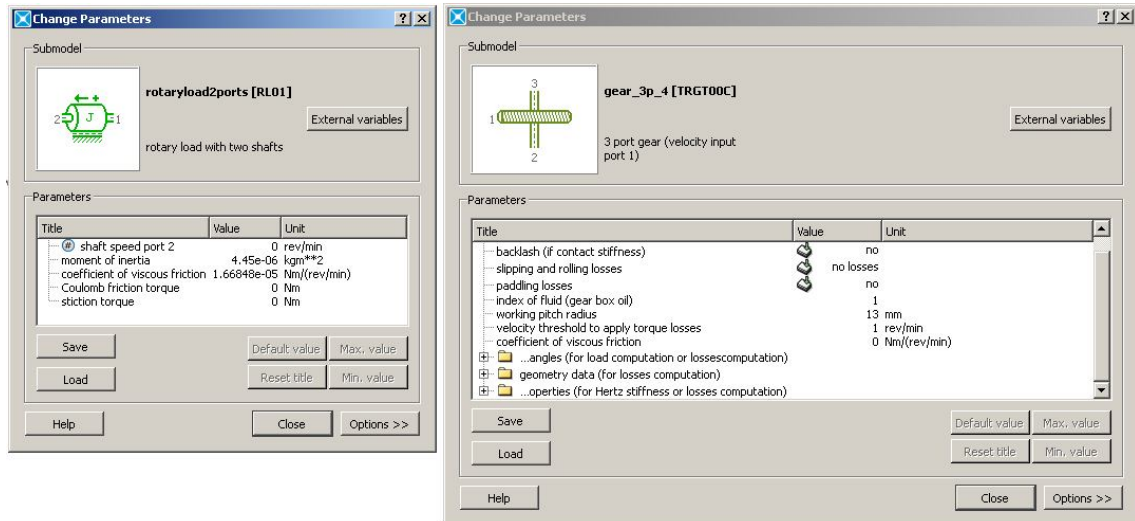
uzwojenia twornika, wartości siły przeciwelektromotorycznej i stałej momentu, rezystancji uzwojenia twornika, indukcyjności uzwojenia twornika, itd.



Rys.6. Określanie parametrów silników w programie AMESim

Zamodelowano również występujące w układzie napędowym przekładnie wraz z założonymi liczbami zębów, średnicami podziałowymi poszczególnych kół (rys.7),

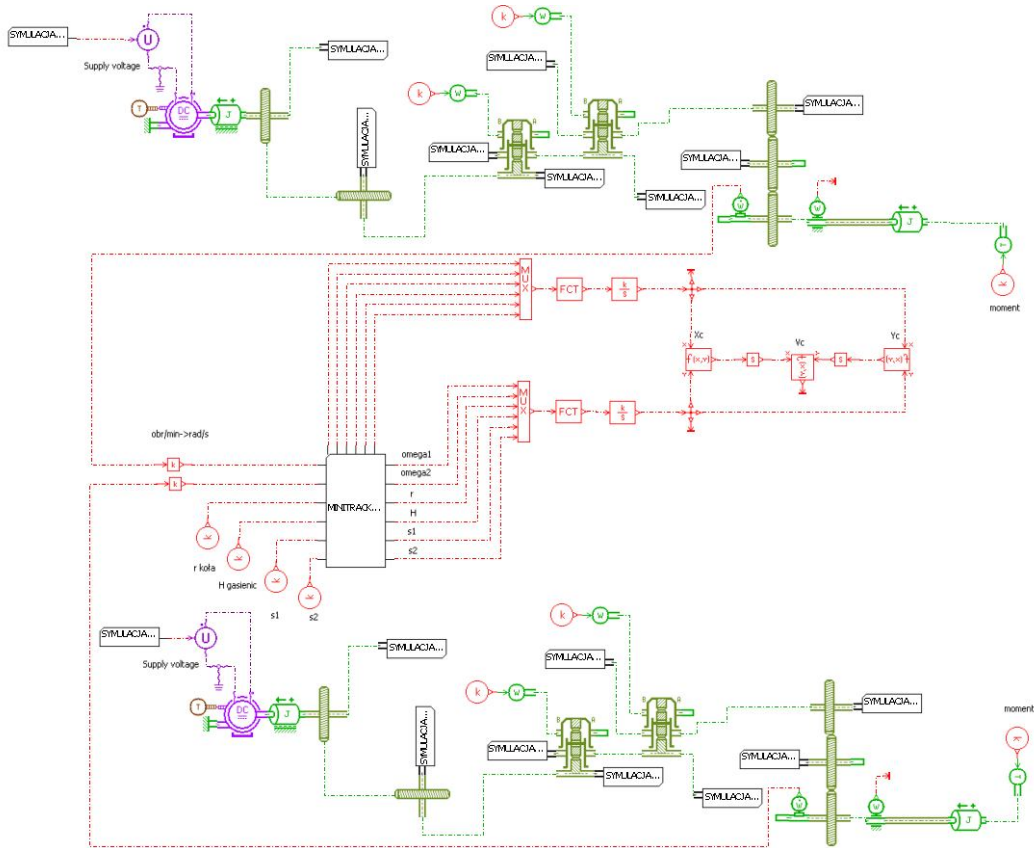
masowymi momentami bezwładności wałów, występującymi stratami, luzami, współczynnikami związanymi ze smarowaniem, itd.



Rys.7. Określanie parametrów przekładni w programie AMESim

Do zamodelowanych układów napędowych robota dołączono elementy (rys.8) wyznaczające na podstawie

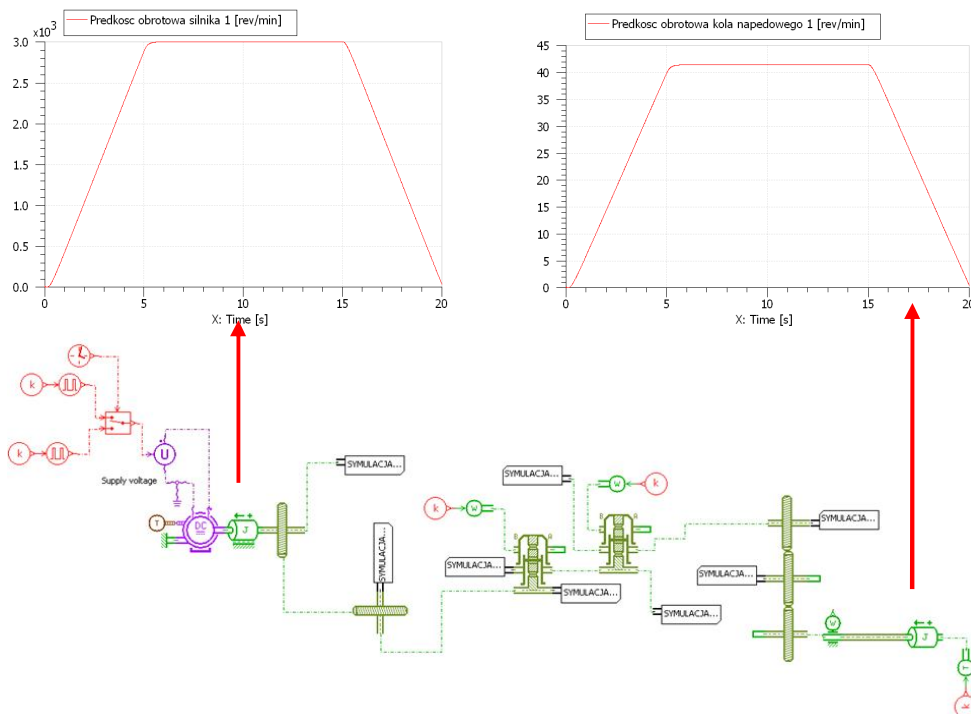
równań kinematyki pozycję robota, jego prędkość i przyspieszenie.



Rys.8. Model układu napędowego wraz z elementami wyznaczającymi parametry ruchu robota

Tak wykonany model umożliwił przeprowadzenie symulacji ruchu gaśienicowego robota inspekcyjnego przy zmiennych parametrach pracy silników napędowych. Otrzymano wykresy przemieszczeń, prędkości (rys.9), przyspieszeń wszystkich elementów układów napędowych.

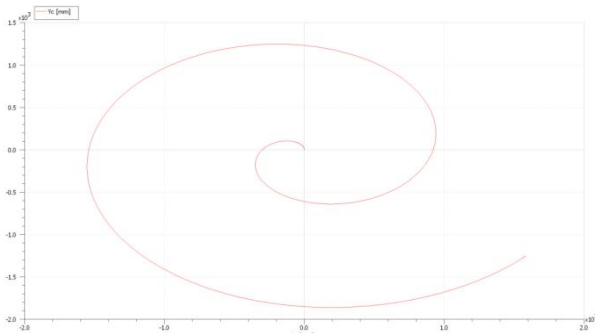
ych. Symulowano poślizgi obydwu i pojedynczej gaśienicy, zakładano momenty na kole napędowym związane z pokonywaniem przez robota wzniesień czy zmianą obciążeń.



Rys.9. Wykresy prędkości poszczególnych elementów układu napędowego

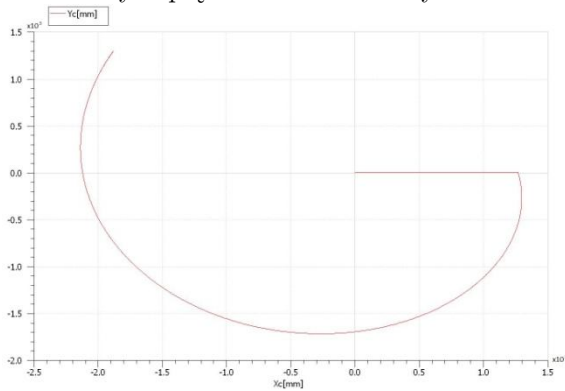
Na rys.7 przedstawiono wykresy prędkości obrotowych silnika oraz głównego koła napędowego jednej z gąsienic robota. Czas symulacji to 20s, podczas których następuje rozprędkowanie silnika (5s). Pracuje on z prędkością znamionową 3000 obr/min (10s) oraz hamowanie (5s). Rysunek przedstawia również prędkość obrotową koła napędowego zmniejszoną 72 razy w wyniku zastosowania przekładni. Zbudowany model umożliwia uzyskanie wykresów parametrów ruchu wszystkich pozostałych elementów robota.

Zbudowany model umożliwia wyznaczenie trajektorii ruchu robota. Na rys.10 pokazano tor ruchu robota przy założonych: znamionowej prędkości obrotowej silnika prawej gąsienicy, połowie prędkości znamionowej silnika gąsienicy lewej oraz braku poślizgu obydwu gąsienic.



Rys.10. Wykres przemieszczenia środka robota przy założonych, różnych prędkościach silników

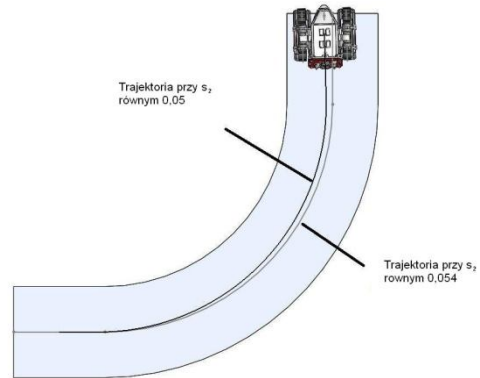
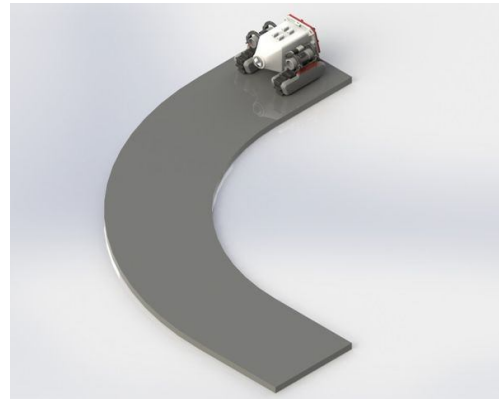
Na rys.11 przedstawiono wykres przemieszczenia środka robota przy założonych takich samych znamionowych prędkościach obrotowych silników.



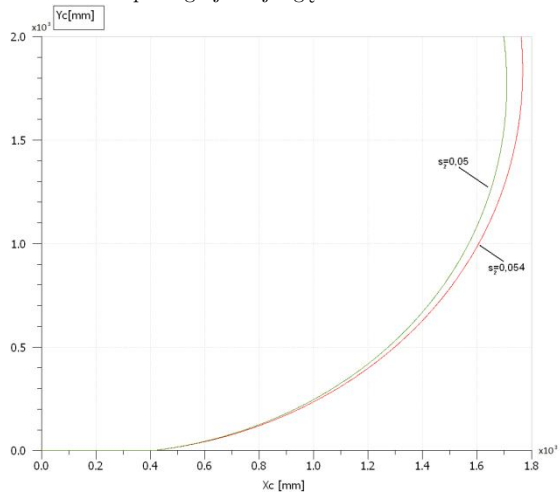
Rys.11. Wykres przemieszczenia środka robota przy pojawieniu się poślizgu jednej z gąsienic w 10s

W 10s ruchu zasymulowano wystąpienie poślizgu jednej z gąsienic, co widoczne jest na rysunku w postaci zmiany trajektorii ruchu robota z prostoliniowej na krzywoliniową.

W kolejnej symulacji (rys.12) założono pojawienie się poślizgu jednej z gąsienic w 5. sekundzie ruchu.



Rys.12. Ilustracja przemieszczania robota przy pojawieniu się poślizgu jednej z gąsienic w 5. s



Rys.13. Porównanie wykresów przemieszczenia środka robota przy pojawieniu się poślizgu gąsienicy o różnych wartościach

Na rys. 13 widoczne jest porównanie wykresów przemieszczenia środka robota przy poślizgu gąsienicy s_2 równym 0,05 (linia zielona) oraz poślizgu równym 0,054 (linia czerwona). Otrzymane wyniki pokazują wpływ współczynnika poślizgu na trajektorię robota gąsienicowego.

3. WNIOSKI

Układy gąsienicowe zwiększają powierzchnię styku pojazdu z podłożem, zmniejszając jednocześnie nacisk jednostkowy, dają możliwość pokonywania wzniesień o względnie dużej wartości kąta nachylenia. Opis

i modelowanie gąsienicowych układów napędowych jest zadaniem skomplikowanym, gdyż oddziałują na nie różnego typu czynniki zmienne w czasie. W przypadku analizy zachowania tego typu robotów bardzo przydatne okazują się modele i symulacje komputerowe. Oszczędzają one czas, pozwalają na ocenę właściwości danego modelu oraz szybkie wprowadzanie ewentualnych zmian. Otrzymany w AMESim model umożliwia wyznaczenie przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń oraz momentów występujących na poszczególnych elementach składo-

wych gąsienic. Symulacje pozwalają na badanie zachowania modelu robota przy różnych parametrach pracy silników, przy zmiennych warunkach środowiska pracy, poślizgach gąsienic, stratach przekładni itd.

Otrzymane wyniki pozwalają na ocenę poprawności zbudowanego modelu matematycznego, mogą zostać zweryfikowane poprzez badania prowadzone na modelu rzeczywistym oraz umożliwiają dobór układu sterowania, który będzie przedmiotem dalszych prac.

Literatura

1. Burdziński Z.: Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego. Warszawa: WKiŁ, 1972.
2. Chodkowski A. W.: Badania modelowe pojazdów gąsienicowych i kołowych. Warszawa: WKiŁ, 1982.
3. Chodkowski A. W.: Konstrukcja i obliczanie szybkobieżnych pojazdów gąsienicowych. Warszawa : WKiŁ, 1990.
4. Dajniak H.: Ciągniki: teoria ruchu i konstruowanie. Warszawa: WKiŁ, 1985.
5. Giergiel J., Hendzel Z., Żylski W.: Zagadnienia dynamiki mobilnych robotów kołowych. „Przegląd Mechaniczny” 1999, nr 13, s. 14 – 19.
6. Giergiel J., Kurc K., Szybicki D., Buratowski T., Trojnecki M.: Modelowanie dynamiki robota podwodnego. „Modelowanie Inżynierskie” 2012, nr 45, t. 14, s. 45 – 51.
7. Giergiel J., Żylski W.: Wybrane zagadnienia kinematyki i dynamiki mobilnych robotów kołowych. W: Materiały warsztatów mobilnych robotów. Warszawa: IPPT PAN, 1997.
8. Spong M.W., Vidyasagar M.: Dynamika i sterowanie robotów. Warszawa: WNT, 1997.
9. www.antyterroryzm.com/product/pl/inspector
10. www.asirobots.com/products/chaos/