

Dr hab. inż. Maciej TROJNACKI, prof. nzw. w PIAP
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP
Inż. Łukasz KAJDER
Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.308

UKŁAD MECHANICZNY DO WYZNACZANIA SIŁ I MOMENTÓW SIŁ PRZENOSZONYCH PRZEZ KOŁO JEZDNE ROBOTA MOBILNEGO PODCZAS JEGO RUCHU

Streszczenie: Praca dotyczy układu mechanicznego do wyznaczania sił i momentów sił przenoszonych przez koło jezdne robota mobilnego podczas jego ruchu. Na początku zwrócono uwagę na znaczenie znajomości sił i momentów sił działających na koło jezdne pojazdu. Wiedza taka może być przydatna na etapie projektowania i optymalizacji konstrukcji mechanicznej pojazdu, a także może być podstawą do opracowywania modeli opon, które są stosowane m.in. do symulacji dynamiki pojazdów. Następnie opisano szczegółowo ideę rozwiązania umożliwiającego wyznaczenie sił i momentów sił przenoszonych przez koło jezdne robota. Przedstawiono praktyczną realizację proponowanego układu opracowaną dla robota czterokołowego z niekierowanymi kołami jezdny. Opracowane rozwiązanie wykorzystuje pomiar sił przenoszonych przez czujniki nacisku zamontowane w okolicy łożysk umieszczonych na osi każdego koła jezdne. Na koniec omówiono metodykę wyznaczania sił i momentów sił działających na koło jezdne, która bierze pod uwagę ruch pojazdu i właściwości zespołu napędowego.

MECHANICAL SYSTEM FOR DETERMINATION OF FORCES AND TORQUES TRANSMITTED BY A WHEEL OF MOBILE ROBOT DURING ITS MOTION

Abstract: The paper concerns a mechanical system for determination of forces and torques transmitted by a wheel of mobile robot during its motion. At the beginning the importance of knowledge of the forces and torques acting on a wheel of the vehicle was highlighted. Such knowledge may be useful during the design and optimization of construction of a vehicle and also can be the basis for the development of the tire models which are used among others for the simulation of vehicle dynamics. Next, the concept of a solution enabling determination of forces and torques transmitted by the wheel of robot was described in detail. Then, an implementation of the proposed system in the four-wheeled mobile robot with non-steered wheels is presented. The developed solution is based on measurement of the forces transmitted by the force sensors located near bearings, which are mounted on the axle of each wheel. Finally, the methodology of determination of forces and torques acting on a wheel, which takes into account motion of the vehicle and characteristics of the drive unit is discussed.

Słowa kluczowe: mobilny robot kołowy, pomiar sił i momentów sił, czujnik siły
Keywords: wheeled mobile robot, force and torques measurement, force sensor

1. WPROWADZENIE

Siły i momenty sił działające na koła jezdne pojazdu mają zasadniczy wpływ na jego ruch oraz trwałość konstrukcji. Z tego względu ich znajomość jest niezwykle istotna w procesie projektowania i optymalizacji konstrukcji mechanicznej robotów kołowych.

Wiedza na temat zjawisk towarzyszących ruchowi robota, w szczególności na temat działających sił i momentów sił, jest także podstawą do opracowywania modeli dynamiki tego typu układu. Tego typu modele mogą być pomocne zarówno w procesie konstruowania robota, jak i syntezy algorytmów sterowania jego ruchem. Opracowane modele dynamiki robotów mobilnych pozwalają na symulację ich ruchu.

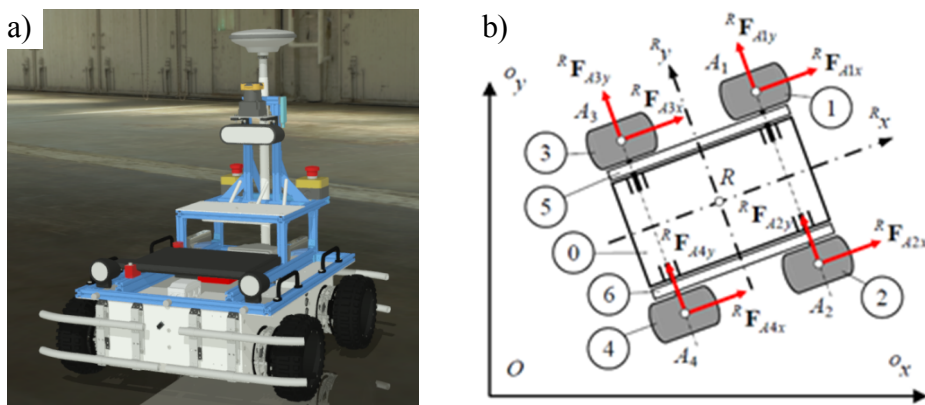
W przypadku robotów poruszających się w warunkach poślizgu w modelu dynamiki robota konieczne jest uwzględnienie tzw. modelu opony. Modele takie są od wielu lat opracowywane dla pojazdów samochodowych, co znajduje odzwierciedlenie m.in. w pracach [2, 7], natomiast rzadko mają zastosowanie w przypadku robotów mobilnych. Jak wskazano w pracy [4], modele opon powinny być w szczególności uwzględnione w przypadku robotów z niekierowanymi kołami jezdными, które w literaturze anglojęzycznej określane są mianem skid-steered robots. W celu opracowania lub weryfikacji modeli opon konieczna jest znajomość sił i momentów sił działających na koła jezdne oraz parametrów ruchu robota, co pozwala na wyznaczenie poślizgów tych kół.

Szczególnie problematyczny jest pomiar sił i momentów sił działających na koła jezdne robota podczas jego ruchu. Dla pojazdów samochodowych dostępne są tego typu rozwiązania komercyjne (ang. *multi-axis wheel force transducers*) [9, 10]. Brakuje jednak podobnych rozwiązań dla małych robotów kołowych. Ze względu na niewielkie ich gabaryty i brak standardów jeśli chodzi o geometrię kół jezdnych, problematyczne byłoby zastosowanie podobnych rozwiązań w istniejących konstrukcjach robotów.

W związku z tym w ramach niniejszej pracy zostanie zaprezentowany dedykowany układ mechaniczny do wyznaczania sił i momentów sił przenoszonych przez koło jezdne małego robota mobilnego podczas jego ruchu.

2. ROBOT PIAP GRANITE

Robotem, dla którego wyznaczane będą siły i momenty sił przenoszone przez jego koła jezdne, jest PIAP GRANITE (ang. *Ground Robot for ANALYZES of wheels Interaction with various TErrain*). Jest to mały robot mobilny z niekierowanymi kołami jezdными, którego model CAD pokazany jest na rys. 1a.



Rys. 1. Robot PIAP GRANITE: model CAD (a), przyjęty model robota (b)

Robot ten zawiera specjalnie zaprojektowany układ pomiarowy, który umożliwia pomiar sił i momentów sił przenoszonych przez jego koła jezdne. Układ ten zostanie szczegółowo opisany w dalszej części niniejszej pracy.

Dodatkowo robot może być wyposażony w hak i czujnik siły pozwalający na pomiar siły, z jaką jest ciągnięty robot. Czujnik taki może być zamocowany w przedniej części robota i może być zastosowany w badaniach różnych przypadków poślizgu kół jezdnych.

Struktura kinematyczna robota jest widoczna na rys. 1b. W modelu robota można wyróżnić następujące podstawowe zespoły: 0 – korpus ze stelażem, na którym zamontowane jest wyposażenie kontrolno-pomiarowe, 1-4 – koła jezdne z kołami pasowymi, 5-6 – paski zębate (opcjonalnie). Początek układu odniesienia związanego z robotem oznaczono literą R , a środki geometryczne kół jezdnych jako A_i , gdzie i jest numerem koła, zgodnie z rys. 1b.

Robot ten został zaprojektowany z myślą o badaniach w zakresie modelowania dynamiki i sterowania ruchem nadążnych dla różnych konfiguracji układu napędowego. Napęd w każdym zespole napędowym może być rozprzężony, co umożliwia uzyskanie następujących konfiguracji układu jezdnego robota:

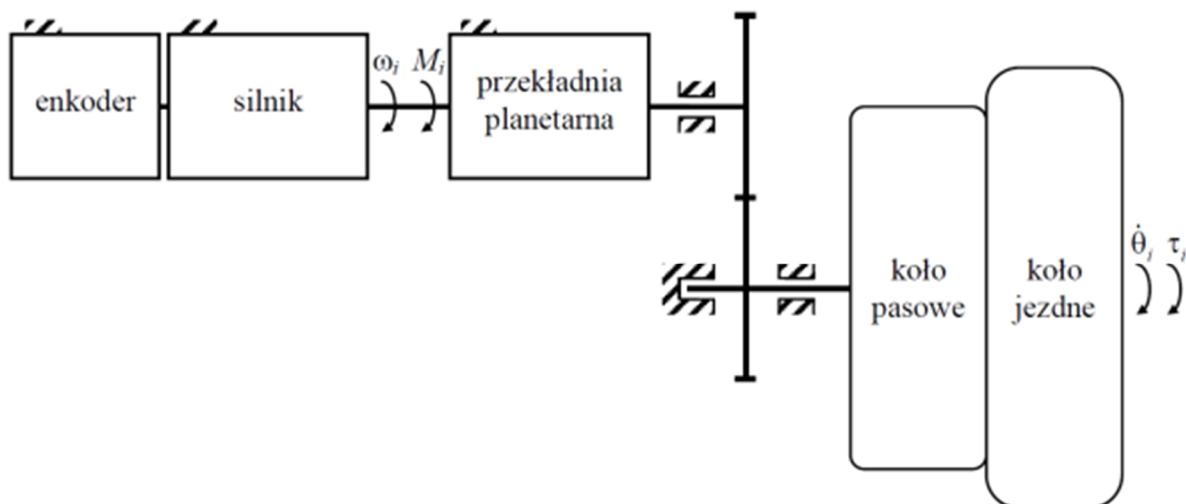
- napędzanie tylko przednich lub tylnych kół jezdnych,
- napędzanie przednich lub tylnych kół jezdnych i przenoszenie napędu na pozostałe koła jezdne przy pomocy pasków zębatych,
- niezależne napędzanie wszystkich kół jezdnych.

Podstawowe parametry robota są następujące:

- wymiary: $L = 0,425$ m, $W = 0,553$ m ($L = A_1A_3 = A_2A_4$, $W = A_1A_2 = A_3A_4$ – zob. rys. 1b),
 $r_i = r = 0,0965$ m (promień geometryczny koła jezdnego),
- masy poszczególnych zespołów: $m_0 = 43,5$ kg, $m_i = 1$ kg, $m_5 = m_6 = 0,18$ kg.

Napędy robota są serwomechanizmami prądu stałego. Napęd z silnika jest przekazywany za pomocą przekładni zębatej na oś koła jezdnego, co zilustrowano na rys. 2.

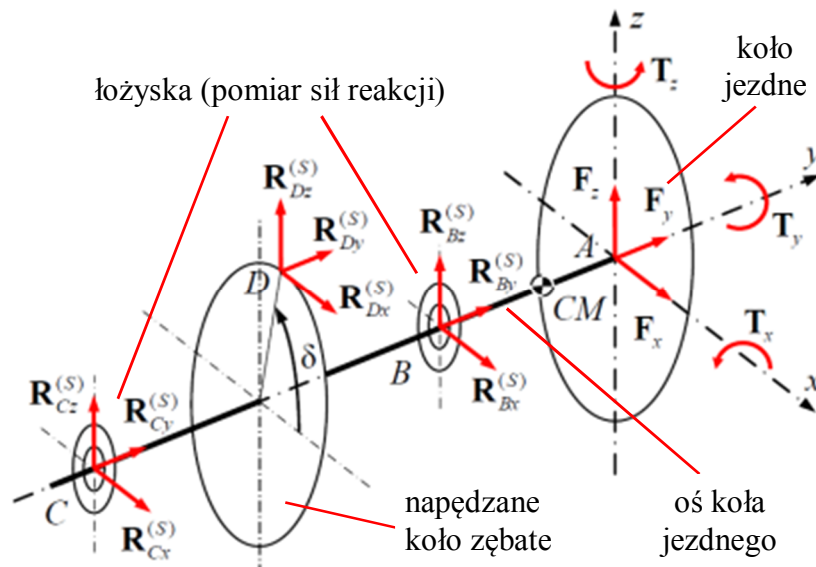
Zaznaczona schematycznie na rysunku przekładnia walcowa może być rozprzężona dla każdego z zespołów napędowych, co umożliwia uzyskanie konfiguracji robota, w której napędzane są tylko przednie lub tylne koła jezdne, a pozostałe koła jezdne nie są napędzane bądź są napędzane za pośrednictwem pasków zębatych umieszczonych na kołach pasowych.



Rys. 2. Schemat zespołu napędowego robota

3. UKŁAD POMIAROWY DO WYZNACZANIA SIŁ I MOMENTÓW SIŁ

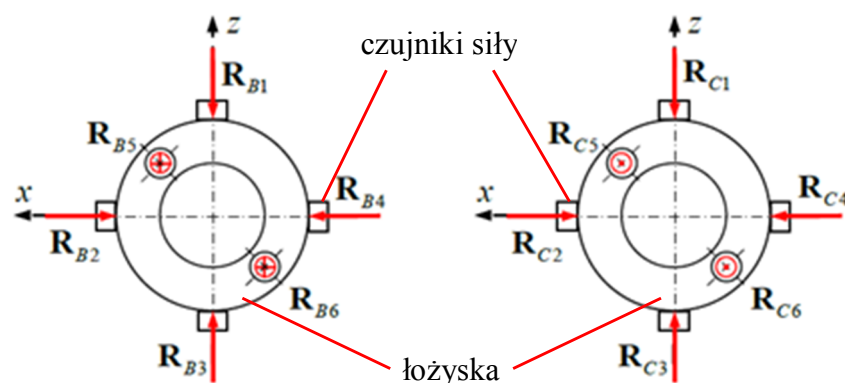
Jak wcześniej wspomniano, konstrukcja mechaniczna robota została zaprojektowana w taki sposób, aby umożliwić pomiar sił i momentów sił przenoszonych przez koła jezdne robota. W tym celu robot jest wyposażony w układ pomiarowy, który stanowi integralną część zespołu napędowego i którego idea polega na pomiarze sił przenoszonych przez łożyska zamontowane na osi koła jezdne. Schemat ideowy takiego układu dla lewego przedniego koła jezdne jest pokazany na rys. 3.



Rys. 3. Schemat ideowy układu do pomiaru sił i momentów sił przenoszonych przez oś koła jezdne

Na rysunku zaznaczono schematycznie koło jezdne o środku w punkcie A , łożyska o środkach odpowiednio w punktach B i C oraz napędzane koło zębate, które współpracuje z kołem napędzającym w punkcie D .

Między łożyskami a obudową robota umieszczone są paskowe czujniki nacisku, które umożliwiają pomiar składowych sił przenoszonych przez łożyska. Ich rozmieszczenie jest zilustrowane na rys. 4. Czujniki siły mierzące składową osiową siły reakcji znajdują się po przeciwległych stronach łożysk.

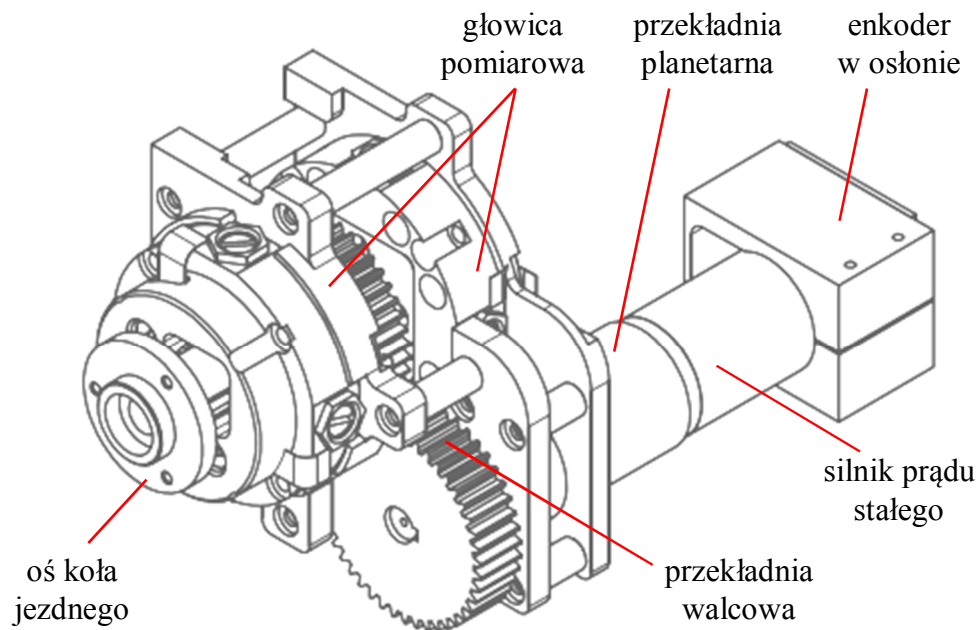


Rys. 4. Rozmieszczenie czujników siły i oznaczenie działających sił

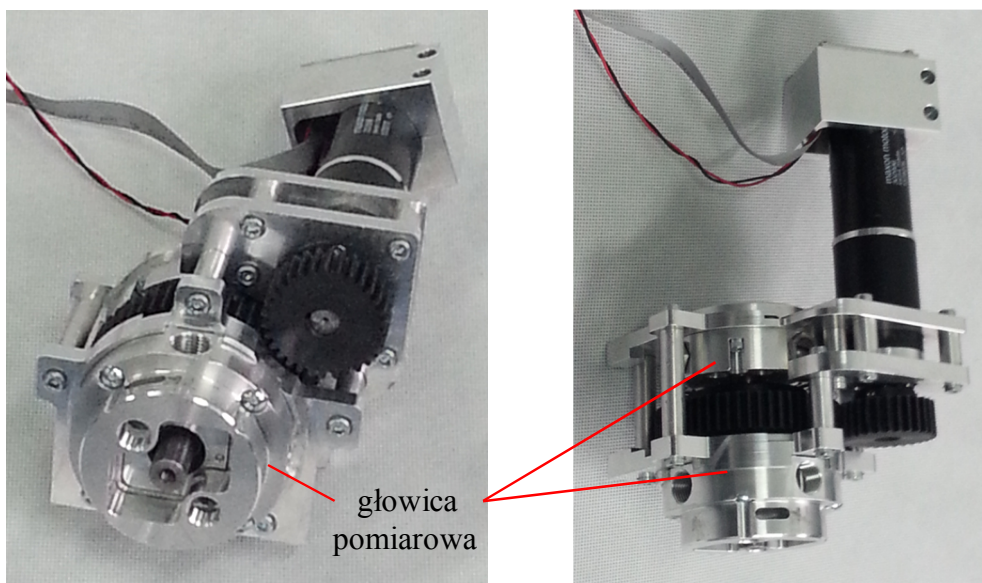
Dzięki proponowanemu rozwiązaniu siły i momenty sił są przenoszone z koła jezdnego poprzez łożyska na poszczególne czujniki siły, co na podstawie pomiaru sił na tych czujnikach pozwala na wyznaczenie sił i momentów sił przenoszonych przez koło jezdne.

Praktyczna realizacja konstrukcji mechanicznej zespołu napędowego z układem pomiarowym przedstawiona jest na rys. 5, natomiast na rys. 6 widoczna jest rzeczywista konstrukcja. Wstępna wersja tego rozwiązania była przedmiotem zgłoszenia patentowego [6] i była dalej rozwijana przez autorów m.in. w ramach pracy [1].

Na obu rysunkach zaznaczone są dwie głowice pomiarowe stanowiące integralną część zespołu napędowego, których zadaniem jest pomiar sił przenoszonych przez łożyska. Przez obie głowice pomiarowe przechodzi oś, która jest napędzana przez silnik i na której jest zamocowane koło jezdne.



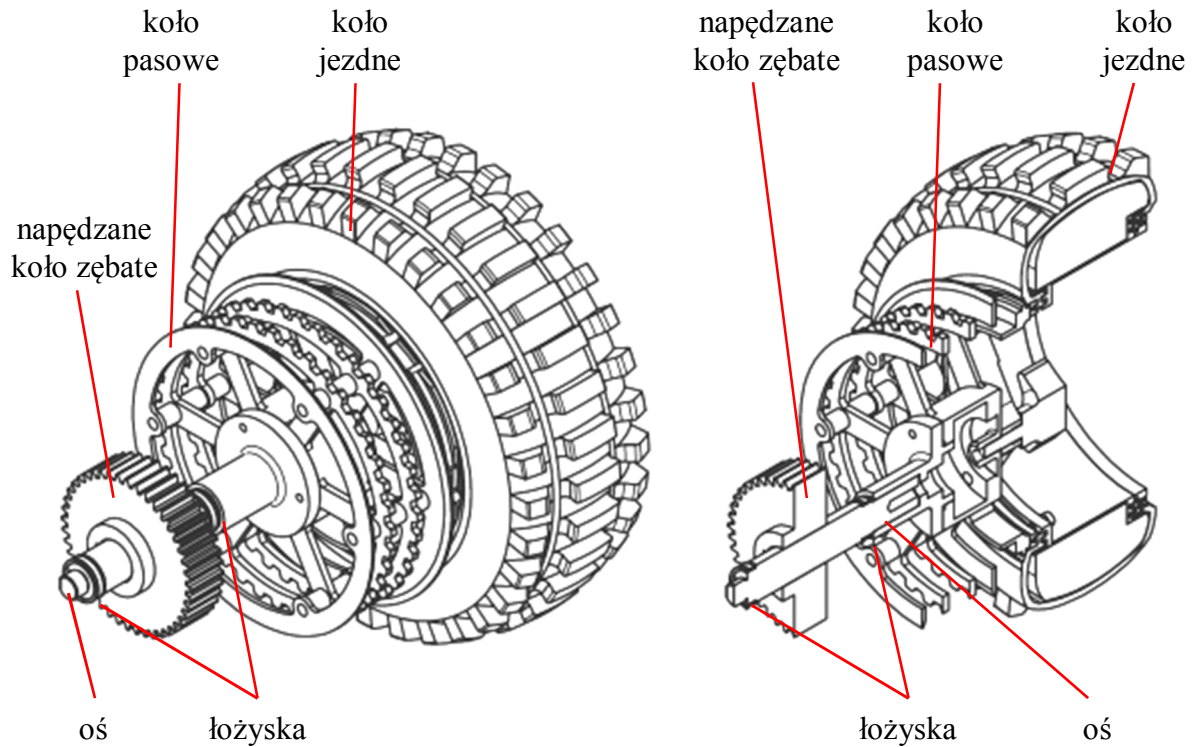
Rys. 5. Projekt konstrukcji mechanicznej zespołu napędowego robota



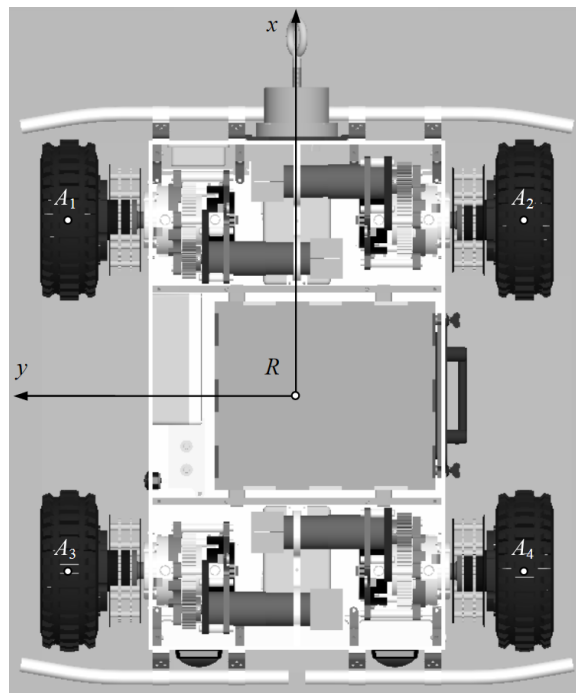
Rys. 6. Konstrukcja mechaniczna zespołu napędowego robota

Projekt konstrukcji mechanicznej osi wraz z umieszczonymi na niej łożyskami i kołem zębatym oraz zamocowanym do niej kołem pasowym i kołem jezdnym przedstawiony jest na rys. 7.

Z kolei na rys. 8 pokazane jest rozmieszczenie zespołów w korpusie robota. Na rysunku tym widoczny jest także wcześniej wspomniany czujnik siły z hakiem, umożliwiający pomiar siły, z jaką jest ciągnięty robot.



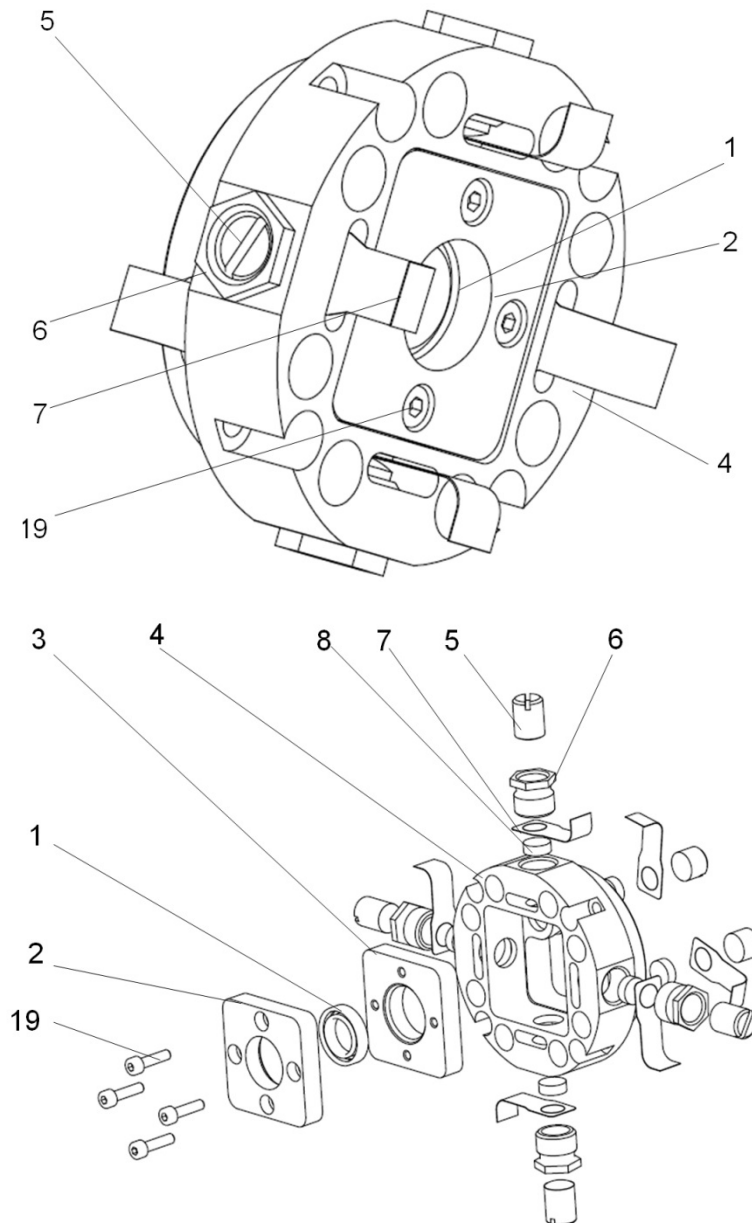
Rys. 7. Projekt konstrukcji mechanicznej zespołu: oś, napędzane koło zębate, łożyska, koło pasowe i koło zębate



Rys. 8. Rozmieszczenie zespołów napędowych w korpusie robota

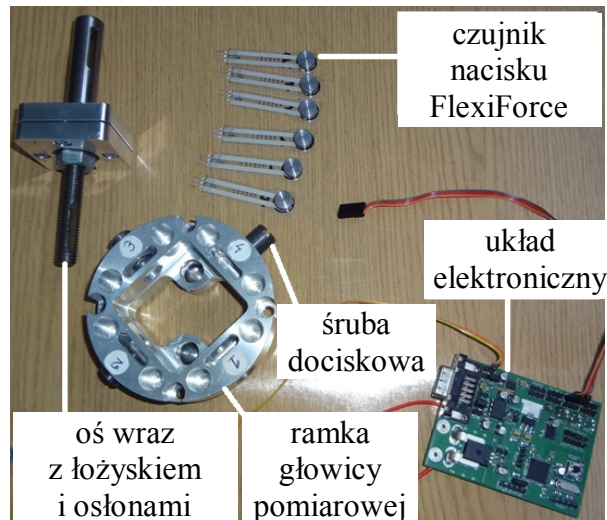
Na rys. 9 widoczne są szczegóły konstrukcyjne głowicy pomiarowej. W skład głowicy pomiarowej wchodzi:

- łożysko 1, które przenosi siły i momenty sił działające na oś,
- osłony łożyska 2 i 3, skrócone przy pomocy śrub 19,
- ramka głowicy pomiarowej 4,
- 6 paskowych czujników nacisku 7,
- śruby 6 i śruby drobnozwojne 5 umożliwiające wstępne obciążenie czujników
- oraz żetony 8, które przenoszą siły z osłon 2 i 3 na czujniki nacisku 7.



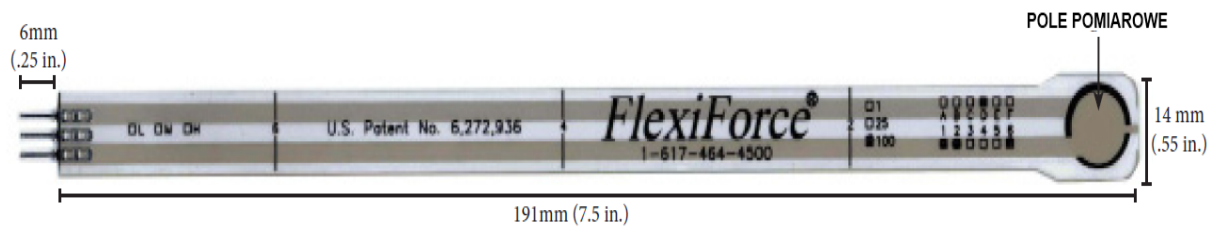
Rys. 9. Konstrukcja mechaniczna głowicy pomiarowej

Rzeczywistą konstrukcję głowicy pomiarowej wraz z czujnikami siły i dedykowanym układem elektronicznym do ich obsługi przedstawiono na rys. 10. Układ elektroniczny wyznacza siły działające na czujniki siły na podstawie aktualnych pomiarów i znanych charakterystyk poszczególnych czujników, a następnie przesyła wyniki do magistrali CAN robota.

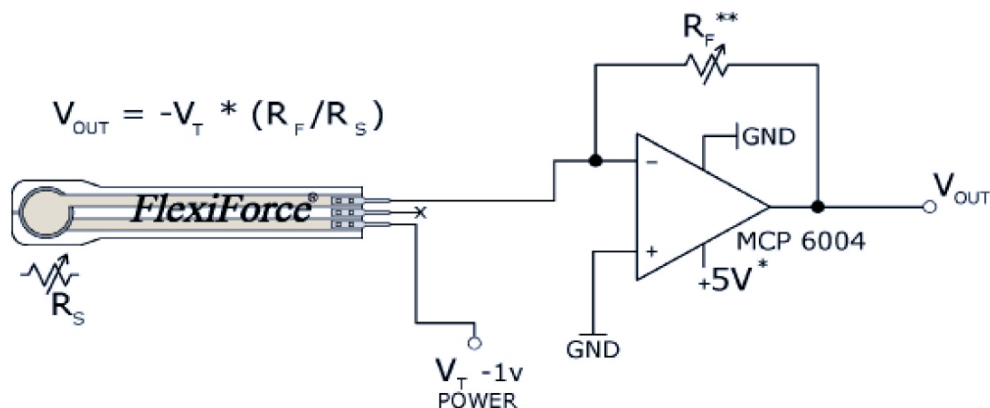


Rys. 10. Rzeczywista konstrukcja głowicy pomiarowej wraz z czujnikami siły i dedykowanym układem elektronicznym

W głowicy pomiarowej zastosowano czujniki nacisku FlexiForce firmy Tekscan [8] (rys. 11). Rezystancja tego czujnika zmienia się wraz z działającą siłą w polu pomiarowym. Ideę układu pomiarowego zamieszczono na rys. 12.

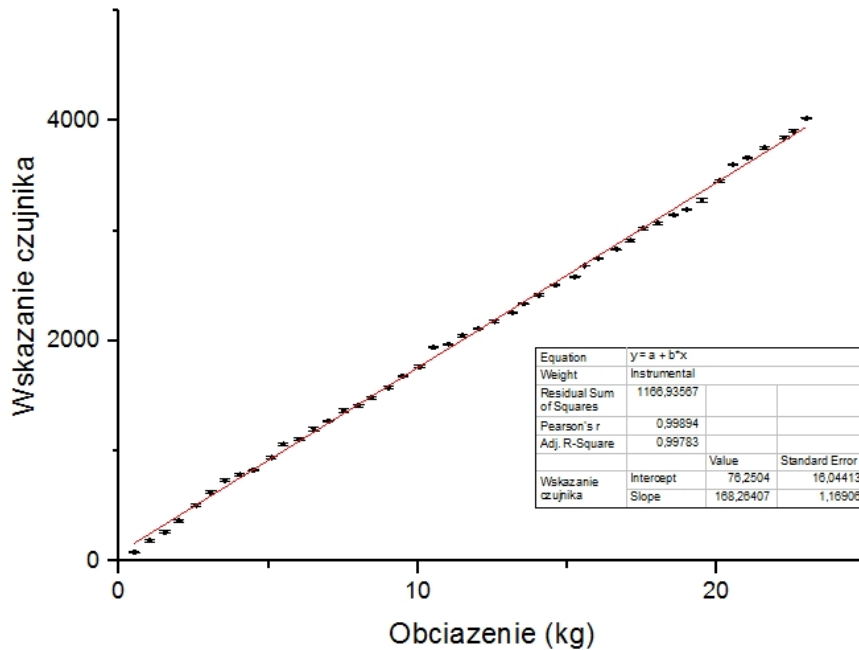


Rys. 11. Czujnik FlexiForce firmy Tekscan [8]



Rys. 12. Idea układu pomiarowego [8]

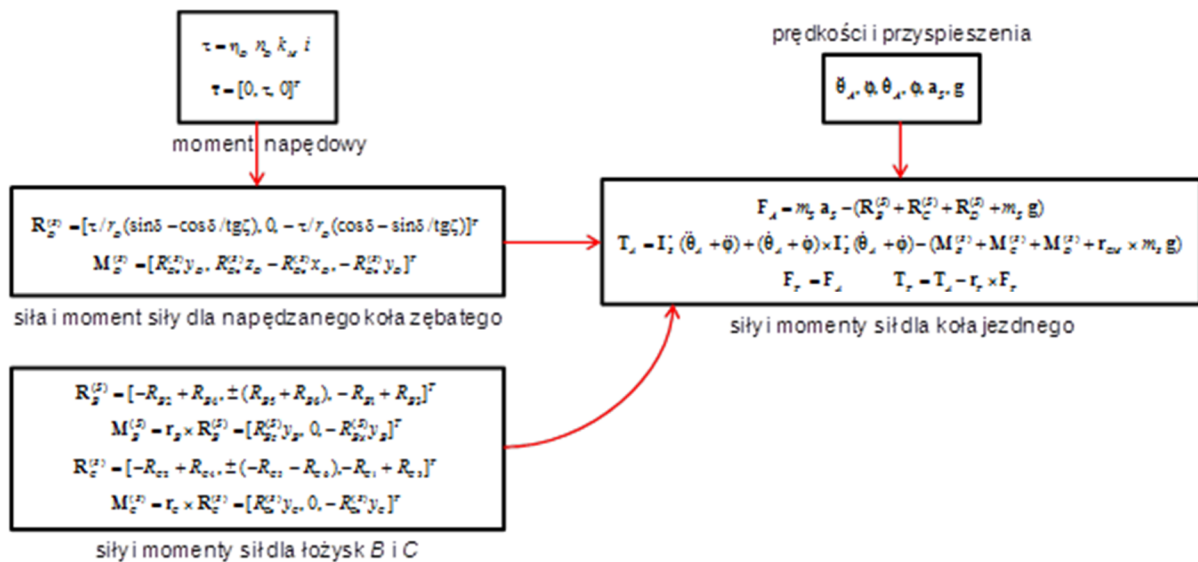
Ze względu na różnice jeśli chodzi o charakterystyki czujników nacisku, konieczne było wyznaczenie charakterystyk poszczególnych czujników. W tym celu przeprowadzono pomiary dla różnych znanych obciążeń dla wszystkich czujników. Przykładowa charakterystyka czujnika nacisku widoczna jest na rys. 13.



Rys. 13. Przykładowa charakterystyka czujnika nacisku uzyskana w wyniku badań

4. METODYKA WYZNACZANIA SIŁ I MOMENTÓW SIŁ

W oparciu o zaproponowane rozwiązanie została opracowana metodyka wyznaczania sił i momentów sił przenoszonych przez koło jezdne robota, której szczegóły opisano w artykule [3]. W ramach niniejszej pracy zostanie tylko pokrótce omówiona idea tej metodyki, którą zilustrowano na rys. 14.



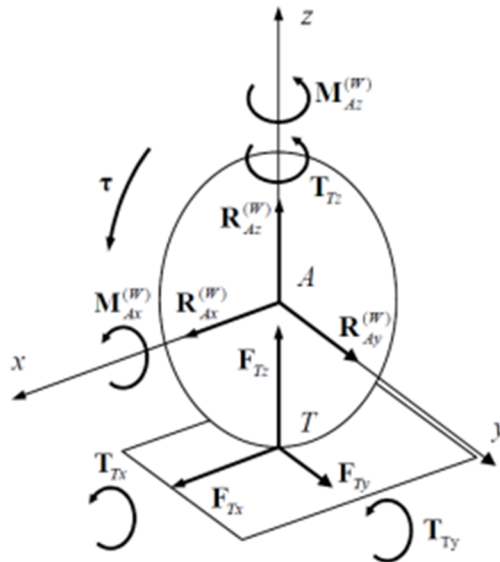
Rys. 14. Ilustracja metodyki wyznaczania sił i momentów sił przenoszonych przez koło jezdne robota

Wg proponowanej metodyki należy dla każdego zespołu napędowego robota wyznaczyć:

- 1) wartości momentów napędowych na podstawie zmierzonego poboru prądu przez napędy robota oraz znając parametry silnika i przekładni,

- 2) wektory sił i momentów sił reakcji przenoszonych przez napędzane koło zębate umieszczone na osi koła jezdnego,
- 3) wektory sił i momentów sił reakcji łożysk B i C (rys. 3) na podstawie pomiarów z czujników nacisku,
- 4) wektory sił i momentów sił działające na koło jezdne, zredukowane do punktu A (rys. 3) na podstawie dynamicznego równania ruchu dla osi koła jezdnego,
- 5) wektory zewnętrznych sił i momentów sił reakcji działające w punkcie kontaktu koła jezdnego z podłożem.

Wszystkie siły i momenty sił działające na koło jezdne zilustrowano na rys. 15, gdzie: τ – moment napędowy, $\mathbf{F}_T = [F_{Tx}, F_{Ty}, F_{Tz}]^T$ i $\mathbf{T}_T = [T_{Tx}, T_{Ty}, T_{Tz}]^T$ – zewnętrzne siły i momenty sił reakcji działające w punkcie kontaktu koła jezdnego z podłożem T , $\mathbf{R}_A^{(W)} = [R_{Ax}^{(W)}, R_{Ay}^{(W)}, R_{Az}^{(W)}]^T$, $\mathbf{M}_A^{(W)} = [M_{Ax}^{(W)}, M_{Ay}^{(W)}, M_{Az}^{(W)}]^T$ – wektory siły i momenty sił reakcji działające na koło jezdne.



Rys. 15. Ilustracja sił i momentów sił działających na koło jezdne robota

W celu wyznaczenia sił i momentów sił działających na koła jezdne robota podczas jego ruchu konieczna jest znajomość parametrów ruchu robota oraz wektora przyspieszenia grawitacyjnego w układzie związanym z robotem, które można uzyskać m.in. za pomocą układów pomiaru bezwładnościowego. Tematyka wyznaczania parametrów ruchu robota z zastosowaniem układów pomiaru bezwładnościowego była przedmiotem publikacji [5].

W pierwszym przybliżeniu można dla uproszczenia pominąć parametry ruchu robota i w konsekwencji wynikające z nich siły bezwładności. Takie założenie jest szczególnie uzasadnione podczas ustalonego ruchu robota.

5. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W ramach pracy zaprezentowano konstrukcję mechaniczną układu służącego do wyznaczania sił przenoszonych przez koło jezdne, którą zastosowano w robocie PIAP GRANITE. Omówiono także ideę metodyki wyznaczania sił i momentów sił z zastosowaniem tego układu.

Przeprowadzono wstępne badania doświadczalne zaproponowanego rozwiązania w warunkach statycznych, podczas których głowicę pomiarową poddawano obciążeniom różnymi znanymi stałymi siłami (co do kierunku i wartości). Wyniki wykonanych badań potwierdziły poprawność działania układu.

W ramach dalszych prac planuje się przeprowadzenie badań zaproponowanego układu w warunkach zmiennych obciążeń dynamicznych oraz pomiar sił przenoszonych przez poszczególne koła jezdne robota podczas wykonywania przez niego różnych manewrów.

Zakłada się, że na podstawie pomiaru sił i momentów sił działających na koła jezdne robota możliwe będzie także opracowanie nowych modeli opon oraz weryfikacja istniejących, co można będzie wykorzystać w badaniach symulacyjnych dynamiki mobilnych robotów kołowych.

Niniejsza praca została zrealizowana w ramach projektu pt. „Modelowanie dynamiki mobilnego robota czterokołowego i sterowanie jego ruchem nadążnym z ograniczeniem poślizgu kół jezdnych”. Projekt jest finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/B/ST7/02532.

LITERATURA

- [1] Kajder Ł.: *Opracowanie układu do pomiaru sił przenoszonych przez oś jezdną robota mobilnego*, praca dyplomowa inżynierska realizowana przy współpracy z PIAP, promotor: Szewczyk R., konsultant w PIAP: Trojnecki M., Politechnika Warszawska, Warszawa, 2014.
- [2] Pacejka H.B.: *Tire and Vehicle Dynamics. 2nd Edition*, SAE International and Elsevier, 2005.
- [3] Trojnecki M.: *Determination of Forces and Torques Transmitted by the Wheel of a Mobile Robot during Motion*, artykuł zgłoszony na konferencję Mechatronics: Ideas for Industrial Applications, 11-13.05.2015.
- [4] Trojnecki M.: *Modelowanie dynamiki mobilnych robotów kołowych*, Oficyna Wydawnicza PIAP, Warszawa, 2013.
- [5] Trojnecki M., Dąbek P.: *Determination of Motion Parameters with Inertial Measurement Units. Part 2: Algorithm Verification with a Four-Wheeled Mobile Robot and Low-Cost MEMS Sensors*, Mechatronics: Ideas for Industrial Applications, Series: “Advances in Intelligent Systems and Computing”, Springer International Publishing, 2015, 253-267.

- [6] Trojnacki M., Kajder Ł., Zboiński M.: *Urządzenie do pomiaru sił i momentów sił przenoszonych przez koło jezdne pojazdu*, Zgłoszenie patentowe nr P.406966, 27.01.2014.
- [7] Wong J.Y.: *Theory of Ground Vehicles. 3rd Edition ed*, 2001, Wiley-Interscience.
- [8] FlexiForce A201 Sensor | Tekscan, 31.02.2015, <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a201>.
- [9] *Vehicle onboard measuring system*, Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., 19.02.2015, http://www.pcb.com/auto/MultiAxis_Wheel_Force_Transducer.aspx.
- [10] *Multi-Axis Wheel Force Transducer for Automotive Road Load Data Measurement Applications*, PCB® Piezotronics, 19.02.2015, http://www.tml.jp/e/product/automotive_ins/automotive_ins_sub/automobile.html.