

# ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA MOBILNEGO ROBOTA KOŁOWEGO DO CELÓW EKSPLORACYJNYCH

Waldemar Mucha<sup>1a</sup>

<sup>1</sup>*Institut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Politechnika Śląska*

<sup>a</sup>*waldemar.mucha@polsl.pl*

## Streszczenie

Niniejsza praca dotyczy (wykonanej w procesie projektowo-konstrukcyjnym) analizy wytrzymałościowej konstrukcji mechanicznej trójkołowego robota mobilnego do celów eksploracyjnych. Robot ten ma za zadanie sprawdzać warunki otoczenia w miejscach niedostępnych bądź potencjalnie niebezpiecznych, przesyłając bezprzewodowo obraz z kamery. W celu opracowania konstrukcji mechanicznej wykonano statyczne i dynamiczne analizy wytrzymałościowe metodą elementów skończonych.

**Słowa kluczowe:** robotyka, mobilny robot kołowy, eksploracja, analiza wytrzymałościowa, metoda elementów skończonych

## STRUCTURAL STRENGTH ANALYSIS OF EXPLORATION MOBILE ROBOT

### Summary

This article presents structural strength analysis that refers to a mechanical design project of a tricycle mobile robot for exploration purposes. The robot's task is to check ambient conditions in places potentially dangerous or non-reachable for humans by wirelessly transmitting image captured from a camera. A series of static and dynamic structural strength analyses (using Finite Element Method) was performed in order to verify the project.

**Keywords:** robotics, wheeled mobile robot, exploration, strength analysis, finite element method

## 1. WSTĘP

Robotyka jest od wielu lat bardzo dynamicznie rozwijającą się dziedziną, ponieważ stosowanie robotów niesie za sobą ogromne możliwości oraz zalety. Roboty mogą wykonywać prace w warunkach niebezpiecznych, miejscach niedostępnych dla człowieka, bądź prace monotonne czy niemożliwe do wykonania przez człowieka. Stosowanie robotów pozwala na osiąganie wyższej wydajności w pracy ze względu na szybkość, wysoką powtarzalność i możliwość pracy bez przerw. Klasyfikacji robotów można dokonywać różnie: ze względu na układ napędowy (np. roboty o napędzie elektrycznym, pneumatycznym, hydraulicznym, mieszanym), zastosowanie (np. roboty przemysłowe, roboty eksperymentalne i badawcze, roboty wojskowe i policyjne, roboty eksploracyjne, roboty medyczne, roboty-zabawki, roboty

transportujące), sposób programowania i możliwości komunikacji oraz ze względu na sposób poruszania się. Biorąc pod uwagę ostatni podział, wyróżnić można roboty lądowe, podwodne i pływające oraz powietrzne. Roboty lądowe dzielą się na stacjonarne i mobilne (wśród mobilnych wyróżnia się przede wszystkim kołowe i gąsienicowe, ale spotkać też można koczujące, toczące się i inne) [1], [3].

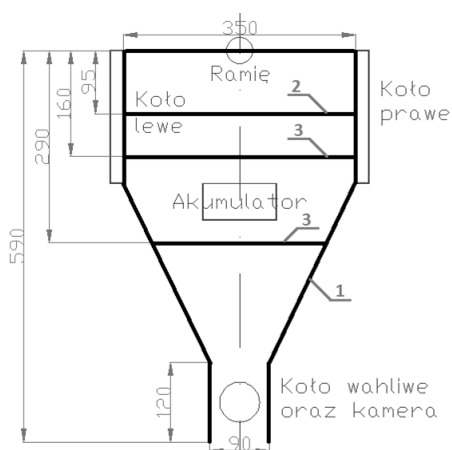
Niniejsza praca poświęcona została robotyce i dotyczyła projektu kołowego robota mobilnego eksploracyjnego, na podstawie którego zbudowano prototyp. Założeniem pracy było, aby opracowany robot mobilny miał za zadanie sprawdzać warunki otoczenia w miejscach niedostępnych lub potencjalnie niebezpiecznych (np. trujące gazy, zagrożenie eksplozją), przesyłając

bezprzewodowo obraz z kamery. Założono, że robot ma poruszać się w pomieszczeniach oraz na zewnątrz, z wykluczeniem trudnych warunków jak piasek, błoto czy śnieg. W tym celu dobrano zawieszenie kołowe (w porównaniu z gąsienicowymi pojazdy kołowe mają mniej skomplikowaną konstrukcję, większą niezawodność, mniejszą masę oraz przede wszystkim mniejsze opory ruchu) składające się z dwóch oddzielnie napędzanych kół na osi przedniej oraz jednego tylnego koła wahliwego wleczonego (zawieszenie trójkołowe gwarantuje łatwość wykonywania manewrów oraz ciągły kontakt wszystkich kół z podłożem) [1], [2].

Oprócz zawieszenia konstrukcja mechaniczna obejmuje konstrukcję nośną (ramę), napęd (dwa silniki elektryczne), układ przeniesienia napędu (przenoszący moment obrotowy z silników na koła) oraz konstrukcję wsporczą kamery bezprzewodowej. Projekt uwzględnia również możliwość doposażenia robota w ramię chwytne do wykonywania określonych prac. Konstrukcja mechaniczna robota narażona będzie na obciążenia pochodzące od ciężaru własnego poszczególnych części, obciążenia ramienia przenoszącego przedmiot, obciążenie układu przeniesienia napędu przez moment napędowy silnika, obciążenia dynamiczne w przypadku ewentualnych kolizji oraz obciążenia związane z siłami bezwładności podczas ruchu (które, ze względu na niewielkie przyspieszenia robota, pominięto w analizie). W opisanym dalej procesie konstrukcyjnym obciążenia te zostały wzięte pod uwagę w analizie wytrzymałościowej poszczególnych części [1], [5].

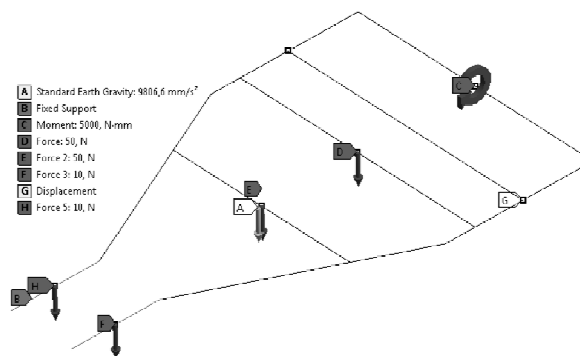
## 2. PROJEKT I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA RAMY

Ramę przyjęto jak na rys. 1. Przekrój oznaczony jako „1” to stalowa rura prostokątna 30x18x1.5 mm, „2” to stalowa rura prostokątna 30x20x1.5 mm (na której umieszczone są dwa układy napędowe), a „3” to kątowniki aluminiowe 40x20x2 mm, pomiędzy którymi spoczywa akumulator.



Rys. 1. Postać geometryczna ramy robota

Do analizy statycznej ramy (liniowa sprężystość) metodą elementów skończonych podzielono ją na 92 elementy skończone 1D belkowe, a warunki brzegowe przyjęto jak na rys. 2. Warunek A każe uwzględniać masę własną ramy, warunek C – szacunkowo przyjęty maksymalny moment pochodzący od chwytnej ramienia (5Nm), siły skupione D i E (50 N) reprezentują ciężar akumulatora, siły skupione F i H (10 N) reprezentują ciężar słupa z kamerą, w miejscu połączenia kół przedniej osi nadano warunek brzegowy G, który odbiera możliwość przemieszczania się w osiach niezgodnych z kierunkiem obrotu kół, natomiast w miejscu połączenia koła wahliwego nadano warunek brzegowy B odbierający wszystkie stopnie swobody.



Rys. 2. Warunki brzegowe w analizie statycznej ramy

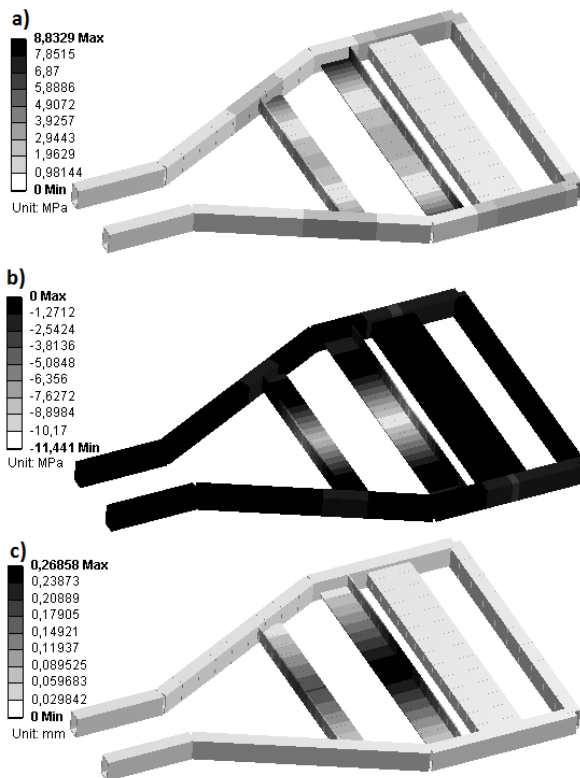
We wszystkich analizach przyjęto własności materiałowe jak podano w tabeli 1 (z bazy materiałów w programie ANSYS Workbench 13.0).

Naprężenia zredukowane w elementach jednowymiarowych program ANSYS Workbench 13.0 przedstawia jako największe naprężenia złożone (*Maximum Combined Stress*) oraz najmniejsze naprężenia złożone (*Minimum Combined Stress*). Pierwsze jest sumą naprężeń pochodzących od rozciągania z maksymalnymi naprężeniami pochodzącymi od zginania w przekroju, a drugie jest sumą naprężeń pochodzących od rozciągania z najmniejszymi naprężeniami pochodzącymi od zginania w przekroju. Wyznaczone w ten sposób naprężenia w ramie okazały się niewielkie, nie przekroczyły 12 MPa, a przemieszczenia wypadkowe nie przekroczyły 0,26 mm.

Tabela 1. Własności materiałowe przyjęte w analizach

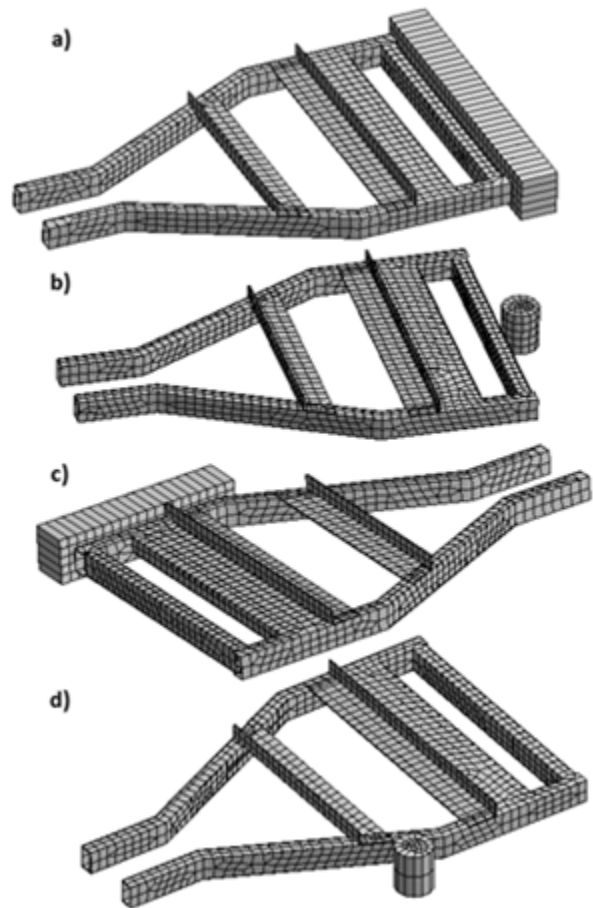
Materiał	Moduł Younga [GPa]	Liczba Poissona	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Granica plastyczności [MPa]
Stal	200	0,3	7850	250
Aluminium	71	0,33	2770	280
Beton	30	0,18	2300	

Rozkład naprężeń i przemieszczeń dla analizy statycznej przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Wyniki analizy statycznej ramy: a) największe naprężenia złożone, b) najmniejsze naprężenia złożone, c) przemieszczenia wypadkowe

W celu weryfikacji wytrzymałościowej konstrukcji robota w przypadku ewentualnej kolizji zasymulowano cztery różne przykładowe uderzenia: uderzenie przodem w betonową ścianę o grubości 50 mm, uderzenie przodem w stalowy słup o średnicy 50 mm, uderzenie bokiem w tę samą ścianę oraz uderzenie bokiem w ten sam słup. W ten sposób wykonane zostały cztery analizy dynamiczne za pomocą modułu *Explicit Dynamics* w programie ANSYS Workbench 13.0. Rury prostokątne i kątowniki ramy oraz betonowa ściana zostały zamodelowane za pomocą elementów powierzchniowych, natomiast stalowy słup został zamodelowany za pomocą elementów trójwymiarowych. W pierwszej analizie cały model podzielono na 1879 elementów skończonych, w drugiej na 2031 elementów skończonych, w trzeciej na 1859, a w czwartej na 1906. Rys. 4 przedstawia podział na elementy skończone modeli każdej z analiz oraz umiejscowienie przeszkody względem ramy robota.



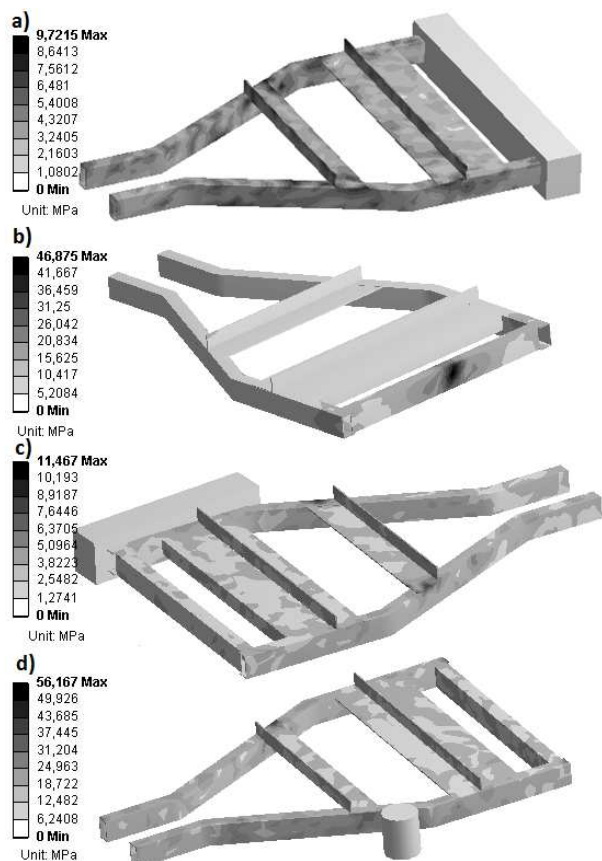
Rys. 4. Podział na elementy skończone dla analiz zderzenia ramy robota z przeszkodą: a) zderzenie centralne ze ścianą, b) zderzenie centralne ze słupem, c) zderzenie boczne ze ścianą, d) zderzenie boczne ze słupem

Jako warunek brzegowy do analiz przyjęto, że powierzchniom przeszkód zostały odebrane wszystkie stopnie swobody.

Jako warunek początkowy do analiz zderzeń centralnych przyjęto poruszanie się ramy z zakładaną maksymalną prędkością robota 0,18 m/s w kierunku przeszkody. Jako warunek początkowy do analiz zderzeń bocznych przyjęto obrót ramy robota, zgodnie z założeniem, że prawe koło wykonuje z maksymalną prędkością ruch obrotowy w tył, a lewe koło ruch z tą samą prędkością w przód, co daje obrót całej ramy z prędkością kątową około 1,1 rad/s. W analizach nie uwzględniono mas silników, ramienia i akumulatora. Czas analiz ustawiono na 2 sekundy, maksymalną liczbę kroków na 10000000, a czas trwania pojedynczego kroku jest kontrolowany przez program.

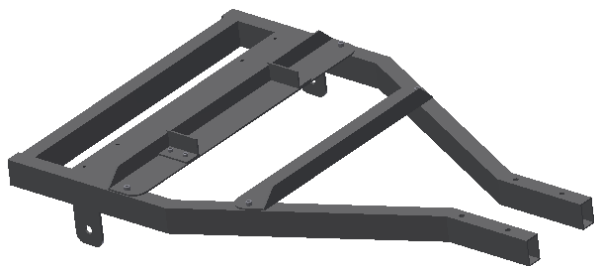
Wyniki maksymalnych (podczas całej analizy) naprężeń zredukowanych hipotezą Hubera-Misesa przedstawia rys. 5. Wyniki pierwszej analizy dotyczą czasu  $1,57 \cdot 10^{-3}$  s, drugiej  $5,08 \cdot 10^{-2}$  s, trzeciej  $1,45 \cdot 10^{-3}$  s, a czwartej  $1,59 \cdot 10^{-3}$  s. Na podstawie rozkładów wywnioskować można, iż przy zderzeniu centralnym ze słupem naprężenia maksymalne występują punktowo w miejscu uderzenia i wynoszą prawie 47 MPa, im dalej zaś od

tego punktu, tym naprężenia są mniejsze. W pozostałych analizach naprężenia rozłożyły się w całej ramie, a maksymalne ich spiętrzenia występują w miejscach innych niż miejsce uderzenia. W zderzeniach ze ścianą są niewielkie i nie przekraczają 12 MPa, natomiast w przypadku zderzenia bocznego ze słupem wynoszą około 56 MPa, jednakże ze względu na chwilowy charakter obciążenia są one dopuszczalne.



Rys. 5. Rozkłady naprężeń redukowanych (w chwili największych naprężeń) dla analiz zderzenia ramy robota z przeszkodami: a) zderzenie centralne ze ścianą, b) zderzenie centralne ze słupem, c) zderzenie boczne ze ścianą, d) zderzenie boczne ze słupem

Wnioskiem końcowym przeprowadzonych analiz wytrzymałościowych jest to, iż konstrukcja ramy jest odporna zarówno na obciążenia statyczne jak i dynamiczne w wyniku uderzeń i nie ma potrzeby wprowadzania zmian do jej postaci geometrycznej przedstawionej na rys. 6.



Rys. 6. Model 3D ramy robota

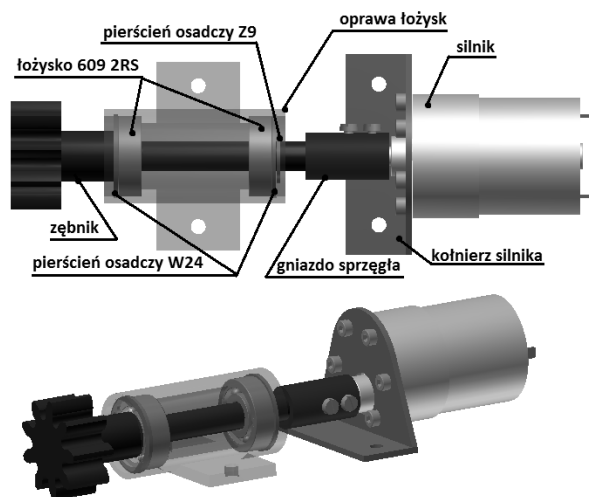
### 3. PROJEKT I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA UKŁADU PRZENIESIENIA NAPĘDU

Zadaniem układu przeniesienia napędu jest przekazanie momentu obrotowego z silnika na koło. Ponieważ robot posiada dwa silniki oraz dwa koła napędzane, występują dwa identyczne układy przeniesienia napędu.

Układ przeniesienia napędu składa się ze sprzęgła (sześciokątnego), łożyskowania oraz przekładni zębatej. Sprzęgło stanowi czop wału (o długości 8 mm i przekroju sześciokąta foremnego wpisanego w okrąg o średnicy 8 mm) oraz odpowiadające mu gniazdo sześciokątne. W celu łożyskowania wału, którego średnicę przyjęto na 9 mm, użyto dwóch łożysk tocznych kulkowych 609 2RS, gdyż posiadają małe opory ruchu oraz dobrze sprawują się przy zmiennych prędkościach obrotowych.

Wiedząc, że prędkość obrotowa dobrego silnika wynosi 100 obr./min, a koło zewnętrzne ma średnicę 21,5 cm, oraz zakładając, że maksymalna prędkość robota wynosić będzie około 180 mm/s, dobrano przekładnię zębatą jednostopniową, której koło napędzające ma 9 zębów, a koło napędzane 55 zębów. Zdecydowano, by koło zębate napędzane posiadało uzębienie wewnętrzne – w ten sposób łatwo będzie je zintegrować z kołem przedniej osi robota. Na podstawie średnicy koła robota dobrano moduł zęba przekładni zębatej na znormalizowany i równy 3. Drugie koło zębate wprasowane zostało na wał napędowy, tworząc zębniak.

Układ przeniesienia napędu przedstawia rys. 7, a felgę koła zintegrowaną z kołem zębatym rys. 8.



Rys. 7. Model 3D układu przeniesienia napędu

#### 3.1. WERYFIKACJA WYTRZYMAŁOŚCIOWA SPRZĘGŁA

Analizę wytrzymałościową sprzęgła wykonano w module *Static Structural* programu ANSYS Workbench 13.0, zakładając liniową sprężystość. W tym

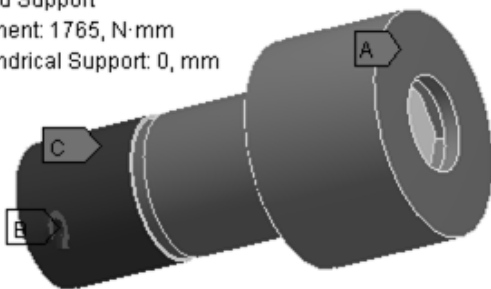
celu zamodelowano dwa ciała: fragment stalowego gniazda sprzęgła oraz fragment stalowego wału. Czop włożono w gniazdo z zachowaniem 1 mm luzu i zadano kontakt tarcowy pomiędzy ciałami, ze współczynnikiem tarcia 0.15, jako tarcie stali o stal, i użyto funkcji *Pinball region* do zdefiniowania wykrywania kontaktu na podstawie odległości pomiędzy ciałami, jako *Pinball radius*, przyjmując 0.02 mm.



Rys. 8. Model 3D felgi z zębieniem wewnętrznym

Analizie poddano najgorszy możliwy przypadek, tj. kiedy koło się zablokuje, a na unieruchomione sprzęgło będzie oddziaływać maksymalny moment napędowy silnika, który przeliczono na 1,765 Nm. W celu łatwiejszego zadania warunków brzegowych, przyjęto obracający się wał i nieruchome gniazdo (przypadek odwrotny niż w rzeczywistości, jednakże obciążenie sprzęgła jest identyczne). Warunki brzegowe modelu ilustruje rys. 9. Na wał działa moment obrotowy odpowiadający maksymalnemu momentowi silnika (warunek B), w miejscu, gdzie wpraszane jest łożysko, zadany jest warunek C, który odbiera stopnie swobody cylindrycznej powierzchni przemieszczeń w kierunkach osiowym i promieniowym i pozwala jedynie na obrót wokół własnej osi. Powierzchni, gdzie ucięte jest gniazdo łożyska, odebrane zostały wszystkie stopnie swobody (warunek A).

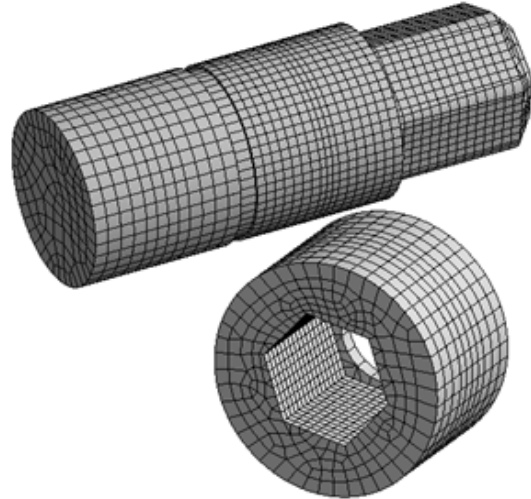
- A** Fixed Support
- B** Moment: 1765, N·mm
- C** Cylindrical Support: 0, mm



Rys.9. Warunki brzegowe w analizie wytrzymałościowej sprzęgła

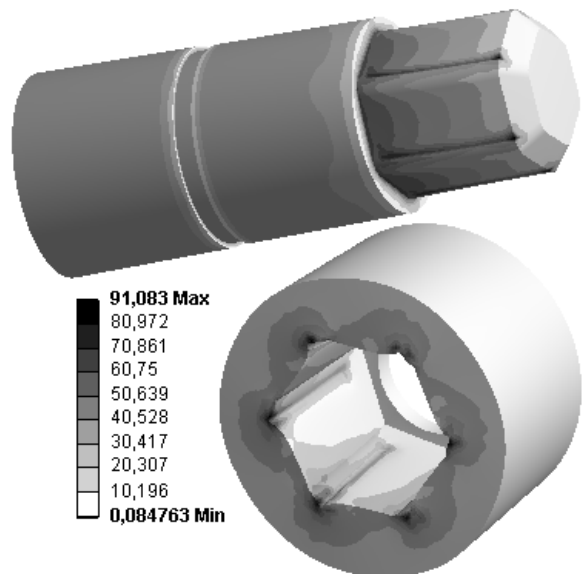
Model podzielony został na 23438 elementów skończonych metodą Hex dominant oraz innymi zabiegami optymalizacji siatki. Podział ciał na elementy skończone przedstawia rys. 10.

Naprężenia zredukowane wg hipotezy Hubera-Misesa poszczególnych elementów sprzęgła zostały przedstawione na rysunku 11. Punktowo, w miejscach spiętrzeń, wynoszą one 91 MPa, natomiast w innych miejscach są znacznie mniejsze.



Rys.10. Dyskretyzacja w analizie wytrzymałościowej sprzęgła

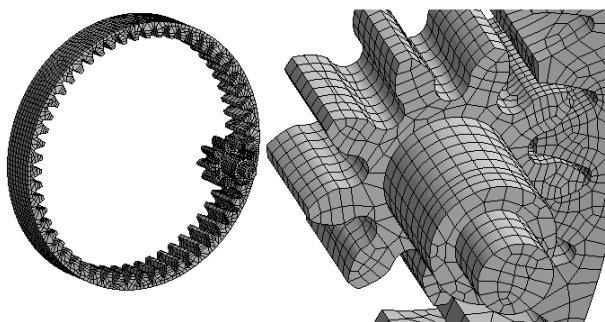
Na podstawie wyników analizy można wywnioskować, że sprzęgło wytrzyma obciążenie w wyniku zablokowania się koła robota. Pomimo występujących znacznych naprężeń maksymalnych nie są one groźne z racji ich chwilowego charakteru, jako że robot posiada zabezpieczenia odcinające prąd do silników, jeżeli koło zablokowane jest przez dwie sekundy.



Rys. 11. Rozkład naprężeń dla analizy wytrzymałościowej sprzęgła

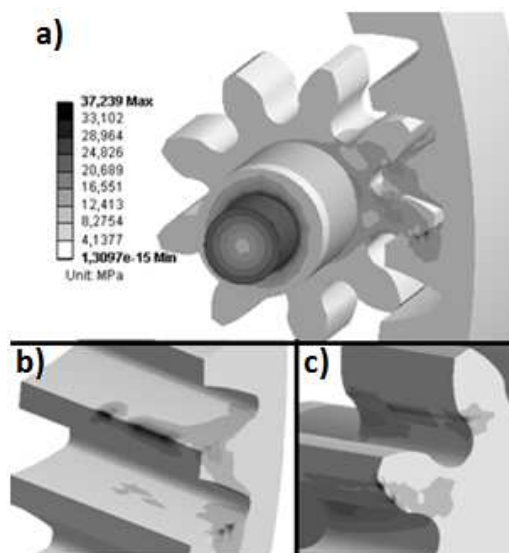
### 3.2. WERYFIKACJA WYTRZYMAŁOŚCIOWA PRZEKŁADNI ZĘBATEJ

Dla przekładni zębatej została wykonana analogiczna analiza jak dla sprzęgła, dla tego samego przypadku obciążenia, kiedy koło robota jest zablokowane, a silnik działa na przekładnię z maksymalnym momentem napędowym. W tym celu zamodelowany został fragment zębnika aż do powierzchni odpowiadającej najbliższej podporze łożyskowej oraz wewnętrzny fragment felgi koła jezdnego robota zintegrowanego z kołem zębatym. Szerokość koła małego to 15 mm, szerokość koła dużego to 25 mm, zązębienie następuje na szerokości 14,5 mm, a odległość pomiędzy osiami kół wynosi 69 mm. Cały model podzielony został na 24265 elementów skończonych metodą *Hex Dominant*, a w pobliżu miejsc kontaktu siatka została zagęszczona, jak pokazano na rys. 12.



Rys. 12. Dyskretyzacja w analizie wytrzymałościowej przekładni zębatej

Na rys. 13. przedstawiono barwną mapę naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa wraz ze zbliżeniami na miejsca spiętrzeń naprężeń. Maksymalne naprężenia zredukowane wyniosły około 37 MPa w punktach spiętrzeń, czyli niewiele dla stali. Można z tego wywnioskować, że dobrana przekładnia zębata wytrzyma maksymalne obciążenie od napędu przy zablokowanym kole.

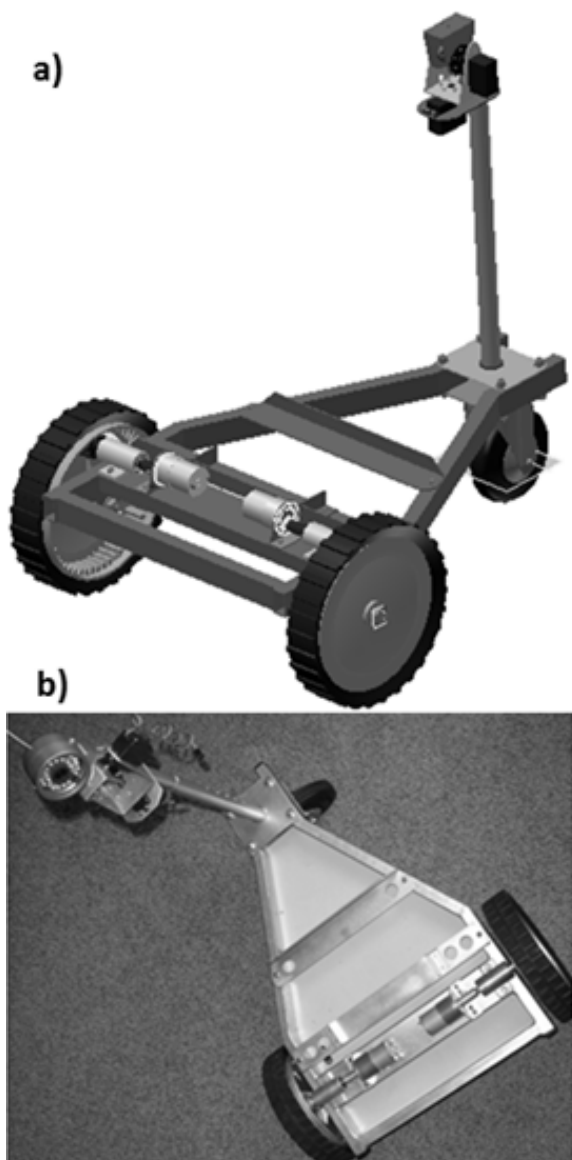


Rys. 13. Naprężenia zredukowane w kołach zębatych: a) mapa naprężeń dla obu kół, b) zbliżenie na spiętrzone naprężenia w kole dużym, c) zbliżenie na spiętrzone naprężenia w kole małym

## 4. MODEL I PROTOTYP ROBOTA MOBILNEGO

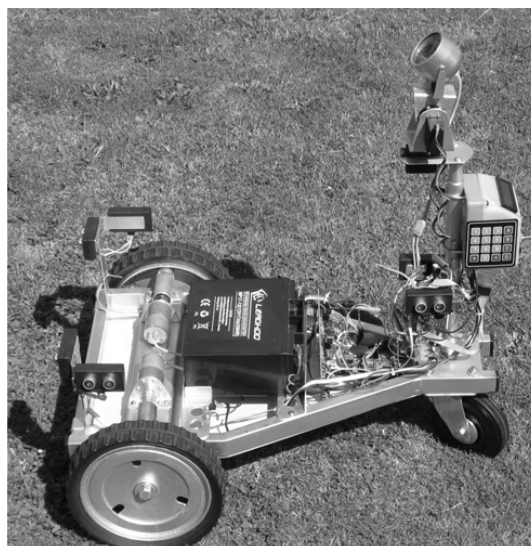
Oprócz opisanych wcześniej elementów konstrukcji mechanicznej robot został wyposażony w kamerę bezprzewodową zamontowaną na specjalnym słupie z mechanizmem umożliwiającym jej ruch w dwóch osiach za pomocą dwóch serwonapędów. Model oraz prototyp całej konstrukcji mechanicznej został przedstawiony na rys. 14.

Wykonano w pełni funkcjonalny prototyp robota mobilnego na podstawie wcześniej opracowanej i wykonanej konstrukcji. Prototyp wyposażono w programowalny układ sterowania z zaimplementowanym algorytmem sterowania. Fotografie prototypu przedstawia rys. 15.



Rys. 14. Konstrukcja mechaniczna robota mobilnego:  
a) model 3D, b) prototyp

Prototyp został przetestowany na różnych podłożach. Konstrukcja mechaniczna robota dobrze sprawdza się w jeździe w pomieszczeniach, po drogach wybrukowanych oraz drogach nieutwardzonych. Maksymalna zmierzona prędkość wynosi 0,1435 m/s, robot może wjeżdżać na strome wzniesienia i pokonywać niskie przeszkody.



Rys. 15. Fotografia gotowego prototypu robota mobilnego

## 5. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przedstawiono sposób weryfikacji wytrzymałościowej kołowych robotów mobilnych metodą elementów skończonych na przykładzie konkretnego projektu robota mobilnego. Pokazano najważniejsze elementy takiej weryfikacji. Na początku poddano analizie główną konstrukcję nośną obciążoną ciężarem własnym, ciężarem innych elementów robota oraz innymi obciążeniami pochodzącymi od tych elementów. W modelu koła jezdne zostały zastąpione podporami. Istotnym elementem weryfikacji wytrzymałościowej robota mobilnego jest sprawdzenie naprężeń w głównej konstrukcji nośnej podczas ewentualnego wypadku (oraz w innych elementach, jeśli biorą w wypadku bezpośredni udział). W tym celu można założyć kilka przykładowych zderzeń z różnymi przeszkodami, w które robot uderza, jadąc ze swoją maksymalną prędkością, i dla każdego zdarzenia wykonać dynamiczną analizę. Oprócz tego należy wykonać również analizy wszystkich innych elementów robota, które narażone są na działanie istotnych obciążeń, np. pochodzących od działania napędów. Do takich elementów mogą się zaliczać komponenty układu przeniesienia napędu, czyli różne wały, sprzęgła, przekładnie. Ich weryfikacji można dokonywać analogicznie do opisanych przykładów.

## Literatura

1. Sandin P. E.: Robot mechanisms and mechanical devices illustrated. The McGraw-Hill Companies, 2003.
2. Giergiel M. J., Hendzel Z., Żylski W.: Modelowanie i sterowanie mobilnych robotów kołowych. Warszawa: PWN, 2013.
3. <http://www.asimo.pl/teoria/robotyka.php>, z dnia 17.10.2013
4. Bąk R., Burczyński T.: Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego. Warszawa: WNT, 2001.
5. Shultz G. P.: Transformers and motors. Butterworth-Heinemann, 1989.