

Mgr inż. Maciej Cader  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów (PIAP)  
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa  
Telefon: +48 22 8740 341, email: mcader@piap.pl

Inż. Łukasz Wilk  
Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa

## **ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA MES KONSTRUKCJI HYBRYDOWEGO ROBOTA MOBILNEGO**

W pracy przedstawiono metodologię analizy MES konstrukcji hybrydowego robota mobilnego, która uległa uszkodzeniu podczas testów poligonowych. Przedstawiono i opisano wyniki symulacji komputerowych mających na celu identyfikację newralgicznych miejsc konstrukcji oraz wyznaczenia przyczyn uszkodzenia robota. Opisano wnioski jakie wyciągnięto w wyniku przeprowadzonych analiz oraz przedstawiono perspektywy dalszych prac nad konstrukcją.

### **FEM STRENGHT ANALYSIS OF THE HYBRID MOBILE'S ROBOT**

The aim of this paper is present the methodology of FEM strength analysis of hybrid mobile's robot that has been damaged during the experiments. In this paper describe the results of FEM analysis, which pointed the sensitive area of robot's construction. It helps also to identify the reason of robot's destruction. Describes findings that were base on FEM analysis and future, planned works related to the hybrid mobile robot's construction.

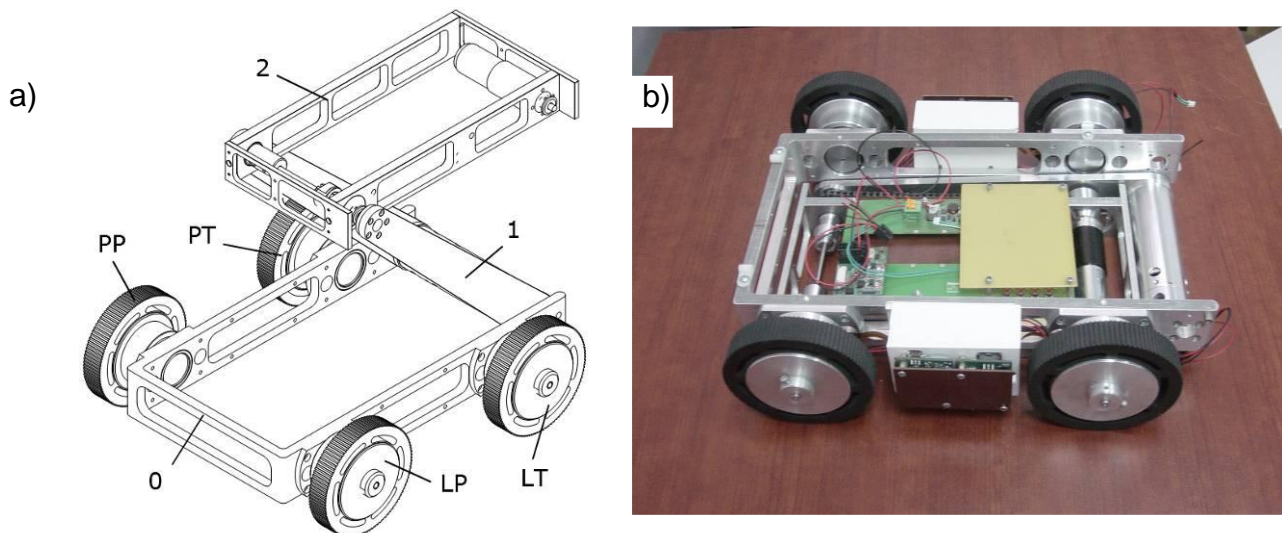
### **1. WPROWADZENIE**

Podczas pierwszych testów prototypu hybrydowego robota mobilnego jego konstrukcja robota uległa szeregowi uszkodzeń, które były spowodowane przez nadążenie wprowadzane zmiany w konstrukcji podczas testów. Wielokrotnie następowało zerwanie łańcucha napędzającego obrót kadłuba [2],[5]. Dodatkowo okazało się, że silnik oryginalnie zamontowany osiowo uległ przemieszczeniu. To w konsekwencji doprowadziło do kolejnego uszkodzenia, tj. skręcenia uchwytu wału silnika napędzającego obrót wspornika, a w konsekwencji wykrzywienia głównej ramy nośnej robota.

W związku z ww. okolicznościami należało wykonać szczegółową analizę wytrzymałościową MES, która będzie stanowiła bazę do modyfikacji konstrukcji robota. Istotne było z jednej strony uwzględnienie nanoszonych w trakcie eksperymentów poprawek do konstrukcji a z drugiej strony taka modyfikacja konstrukcji robota, która zapewni jego bezawaryjną pracę.

## 2. MOBILNY ROBOT HYBRYDOWY

Analizowany robot mobilny to obiekt o niewielkich wymiarach (szerokość: 325mm; długość w pozycji złożonej: 360mm; długość w pozycji rozłożonej: 900mm; wysokość w pozycji złożonej: 110mm) którego całkowita masa to prawie 6,5kg. Robot ma zastosowanie w inspekcji pomieszczeń, budynków, może dokonywać również inspekcji przestrzeni pod zaparkowanymi samochodami, itp. Jest to konstrukcja hybrydowa, gdyż oprócz tradycyjnej metody przemieszczania się (na kołach) może bez problemu pokonywać schody, krawężniki, stopnie, wysokie progi, itp. Stanowi ona rozwinięcie koncepcji prezentowanej w [2]. Szczegółowy opis ruchu robota wraz z wynikami symulacji ruchu wykonanej w programie MD ADAMS znajduje się w [1], zaś jego animacja jest dostępna w [5]. Charakterystyczne elementy platformy mobilnej robota to: podwozie (0) z czterema niezależnie napędzanymi kołami (LP, PP, LT, PT), wspornik (1) i korpus (2). Charakterystyczne dla konstrukcji robota jest to że wspornik (1) może w nieograniczony sposób obracać się względem podwozia (0), a korpus (2) względem wspornika 1.



**Rys.1.** Model robota z oznaczeniem jego członów (a), aktualna konstrukcja robota po uwzględnieniu poprawek, które wyniknęły z testów (b).

## 3. ANALIZA MES

Etap przygotowań do analizy MES rozpoczęto od wyznaczenia maksymalnej siły działającej na łańcuch napędowy. Do tego celu założono najbardziej niebezpieczny scenariusz, tzn. wstępnie nienapięty łańcuch zostaje jeszcze dodatkowo nagle napięty przez obracającą się zębatkę. Zębatka napędzana jest maksymalnym momentem obrotowym jaki jest w stanie wygenerować silnik czyli 6,996Nm, zatem siła działająca na łańcuch wynosi:

$$M - \text{momentobrotowy}[\text{Nm}]$$
$$r - \text{średnicazębatki}[\text{m}]$$

$$F - \text{siła}[\text{N}]$$

$$M = r \cdot F$$

$$F = \frac{M}{r}$$

$$(a) F = \frac{6,996}{0,008955} = 781,239[\text{N}]$$

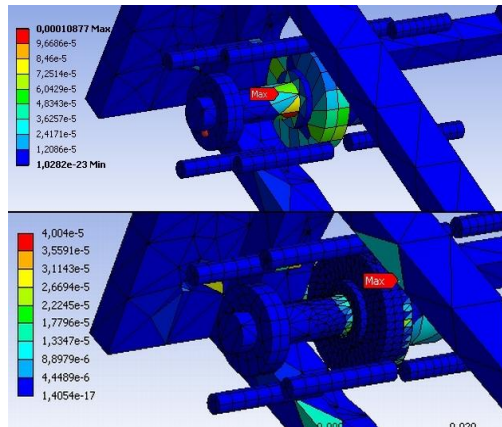
$$(b) F = \frac{4,161}{0,008955} = 464,657[\text{N}]$$

Wynik (a) określa siłę dla pracy silnika z pełną mocą. Wynik (b) określa siłę dla pracy silnika, która wynika z analizy dynamicznej wykonanej w programie *ADAMS* i opisanej w [1]. Przedstawione obliczenia oznaczają że nominalnie łańcuch powinien, z założonym zapasem, wytrzymać siłę 464,657N, jednak z racji zastosowania silnika o maksymalnej mocy 6,99Nm w rzeczywistości łańcuch powinien wytrzymywać siłę co najmniej 781,239N.



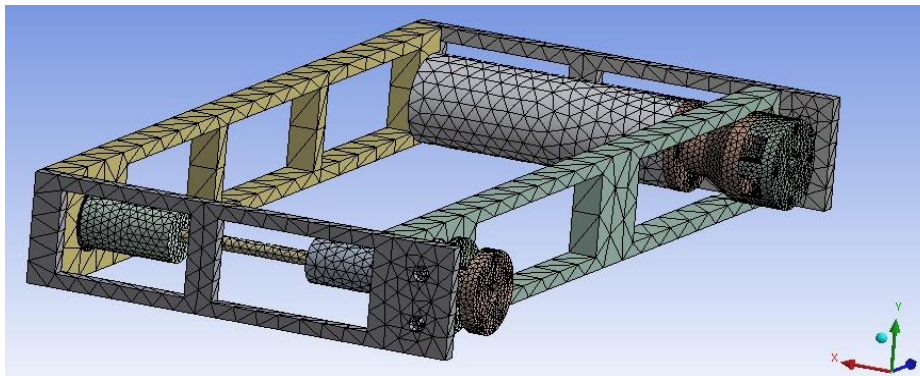
**Rys.2.** Elementy robota uwzględnione w szczegółowej analizie MES.

Analiza MES została wykonana w oparciu o oryginalne pliki CAD robota dostarczone w postaci plików *parasolid* pochodzących z programu *ProEngineer*. W pierwszej kolejności dokonano szeregu uproszczeń konstrukcji robota. Uproszczenie modelu do analizy MES polegało na wykonaniu szeregu zabiegów, które miały na celu usunięcie zbędnych otworów, fazowania, zaokrąglenia oraz zastąpienie skomplikowanych modeli uproszczonymi geometriami. Uproszczenia dokonano po wykonaniu wstępnych analiz zgrubnych, które wykazały że wytypowane do usunięcia/uproszczenia elementy nie wnoszą istotnych zmian do wyników przeprowadzanej analizy, zaś powodują niepożądaną deformację siatki. Oryginalny zespół przeznaczony do analizy MES zawierał definicję 48 modeli, na które składały się 1233 ściany, 2744 krawędzie i 1651 wierzchołki, uproszczony model z kolei posiadał odpowiednio: 30 modeli, 426 ściany, 948 krawędzie i 628 wierzchołki. Nastąpiła zatem znaczna redukcja złożoności konstrukcji, co w efekcie przełożyło się na następującą statystykę modelu do analizy MES: 15088 elementów i 32283 węzłów. Siatka została przygotowana w taki sposób aby obszary analizowanego modelu, które w trakcie analiz wstępnych nie wpływały w sposób istotny na wyniki symulacji były pokryte rzadszą siatką, zaś miejsca wytypowane jako miejsca newralgiczne pokryto siatką znacznie bardziej zagęszczoną. Do wyznaczenia miejsc newralgicznych zastosowano zasadę określaną mianem *submodeling* [3], która zakłada, że wychodząc od dużego modelu i zgrubnych analiz MES zostają zidentyfikowane miejsca newralgiczne lub wymagające szczegółowych analiz i to na nich właśnie będzie skupiała się analiza ostateczna (rys.3).



Rys.3. Submodeling; zagęszczenie siatki w newralgicznym miejscu konstrukcji.

Dodatkowo w trakcie submodelingu analizowano zmiany błędu strukturalnego (*ang. structural error*), czyli różnicy między wartościami uśrednionymi i nieuśrednionymi znajdującymi się na poziomie jednego elementu [4]. Tam gdzie błąd strukturalny miał dużą wartość było to sygnałem do poprawy siatki. Wstępne analizy wykazały, że największe wartości błędu strukturalnego występowały w okolicach wału oraz na łożysku. Siatka została zatem znacznie zagęszczona w tych miejscach. W ten sposób doprowadzono siatkę modelu do ostatecznej wersji prezentowanej na rysunku 4.

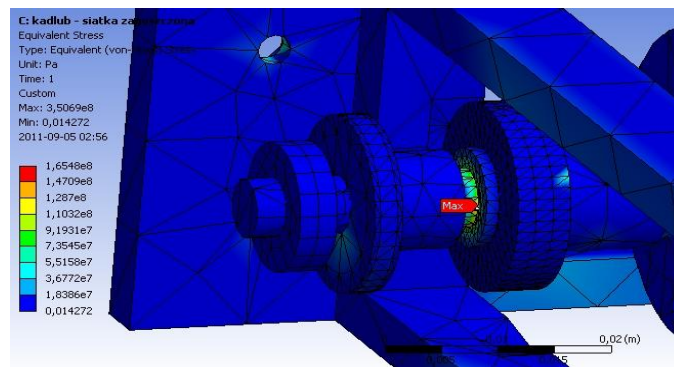


Rys.4. Elementy robota poddane szczegółowej analizie MES z przygotowaną siatką.

W kolejnym etapie przygotowano zdefiniowano typy kontaktów pomiędzy poszczególnymi elementami analizowanej konstrukcji. Jako odpowiednich kandydatów wytypowano dostępne i określone w ANSYS mianem *bonded i joints* typy. Kontakty typu *bonded* to niejako „sklejenie ze sobą” dwóch części w taki sposób, że nie mogą się względem siebie przemieszczać ani obracać. Kontakty typu *joints* to relacje między częściami, które mogą poruszać się względem siebie [4], dla przypadku analizowanej konstrukcji będzie to relacja (para kinematyczna) pomiędzy łożyskiem i wałem silnika.

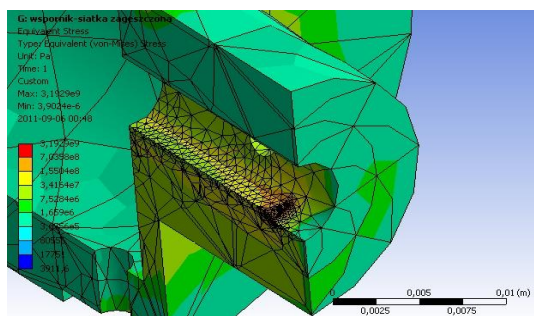
Ostatnim krokiem przed przystąpieniem do analizy było zdefiniowanie odpowiednich warunków brzegowych. I tak: kadłub został utwierdzony w otworach łączących go ze wspornikiem, zaś na górnej części zębataki znajdującej się na osi silnika została przyłożona w pierwszym przypadku siła o wartości równej 464,657N (wynik symulacji w programie ADAMS), zaś w drugim przypadku została zwiększona do wartości równej 781,239N (wartość pochodząca z maksymalnej mocy silnika).

Pierwsza analiza tj. dla mniejszego obciążenia wykazała, że fragment silnika najbardziej oddalony od miejsca łożyskowania przemieścił się o 0,646 mm. Po zwiększeniu obciążenia do maksymalnego (druga analiza), które jest w stanie wygenerować silnik, uzyskano jego przemieszczenie maksymalne równe 1,09 mm. Maksymalne naprężenie wyniosło odpowiednio wówczas odpowiednio 350 i 589 MPa, jednak naprężenia te pojawiły w połączeniu śrubowym jarzma silnika z ramą kadłuba. Ponieważ siły działające na śruby znajdują się w ich osiach, to naprężenia w tym przypadku mieszczą się w bezpiecznym przedziale i nie ma zagrożenia zerwania połączenia śrubowego a więc w dalszej analizie pominięto ten element. Kolejne co do wartości naprężenie pojawiało się na wale silnika – jednak ten zgodnie z wartościami katalogowymi powinien wytrzymać nawet znacznie większe obciążenia. Naprężenia równe odpowiednio 165 MPa i 278 MPa pojawiły się na wale zespołu napędowego w miejscu łożyskowania (rys. 5).



Rys.5. Naprężenia występujące na wale silnika.

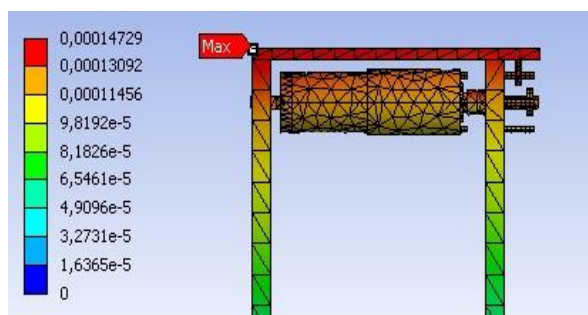
Kolejną częścią konstrukcji, której analizę wytrzymałościową przeprowadzono był wspornik. Powtórzono wszystkie kroki analogicznie jak przy analizie kadłuba: uproszczenie modelu, zdefiniowanie kontaktów, zadanie warunków brzegowych, podział na elementy brzegowe, wstępne analizy, zagęszczenie siatki w miejscach występowania największych błędów strukturalnych i wykonano analizę właściwą. Wspornik zamocowano w miejscach, w których łączy się z podwoziem oraz z kadłubem. Zadano obciążenie w postaci momentu obrotowego o wartości 8,3Nm uzyskanym z symulacji przeprowadzonej w pakiecie ADAMS [1]. Moment obrotowy został przyłożony na przegub, który tworzy obudowa silnika wraz z wałem silnika. Wynik jaki uzyskano potwierdził, że konstrukcja nie miała prawa wytrzymać tak dużych naprężeń. Otóż największe naprężenia pojawiły się w miejscu połączenia wału silnika z uchwytem przekazującym dalej moment obrotowy. Naprężenia w miejscu najbardziej obciążonym wyniosły aż 3191MPa, co w konsekwencji przyczyniło się do uszkodzeń konstrukcji podczas testów. Dodatkowo ANSYS wskazał miejsce uszkodzenia, które potwierdziło się z rzeczywistym.



**Rys.6.** Wyznaczanie maksymalnych naprężeń niszczących, które spowodowały uszkodzenie konstrukcji podczas testów.

#### 4. WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Wykonana analiza MES była niezbędna do identyfikacji miejsca maksymalnego naprężenia niszczącego, identyfikacji przyczyn zrywania łańcucha podczas testów robota, a tym samym szczegółowej analizy przyczyn uszkodzenia jego konstrukcji. Analiza MES pozwoliła na wyeliminowanie błędów konstrukcyjnych wynikających z nanoszenia nadążnie poprawek podczas testów laboratoryjnych konstrukcji robota przy założeniu nie zmienności jego kinematyki. Obecnie poprawiono już konstrukcje znacznie redukując naprężenia występujące na wale wynikające z przyłożenia dodatkowego momentu od wspornika (do wartości dopuszczalnej) oraz w znaczący sposób zmniejszając maksymalne przemieszczenia konstrukcji do wartości 0,15 i 0,5 mm (rys. 7) przy maksymalnym obciążeniu.



**Rys.7.** Wynik wstępnej analizy przemieszczenia konstrukcji, przeprowadzony po naniesionych poprawkach.

Dalsze kierunki badań konstrukcji, to oprócz udoskonalania kinematyki robota także przede wszystkim redukcja jego masy przy zachowaniu dotychczasowych parametrów wytrzymałościowych w celu zmniejszenia momentów pochodzących z ruchu tejże masy. Do tego celu zostanie użyty moduł DesignXplorer dostępny w oprogramowaniu ANSYS. Kolejnym etapem badań po wykonaniu optymalizacji będzie wykonanie analiz CFD (analiz przepływów) w celu określenia miejsc w konstrukcji robota, które mogą być narażone na zanieczyszczenia w postaci unoszącego się pyłu, piasku. Prezentowany robot jest konstrukcją stosunkowo niską, a ze względu na typ pracy i środowisko w jakim robota będzie pracował oraz biorąc pod uwagę wnioski z testów poligonowych okazuje się że problem zapylenia robota nie powinien zostać zlekceważony.

## LITERATURA

- [1] Trojnacki M., Wilk Ł.: *Symulacja ruchu mobilnego robota hybrydowego z zastosowaniem programu MD Adams*, Mechanik 1/2012 (dodatek na CD)
- [2] Trojnacki M., Różycki Ł.: Roboty mobilne o specyficznych układach jezdnych i hybrydowe. Synteza ruchu mobilnego robota hybrydowego, Przegląd mechaniczny 3/2011, 20-25.
- [3] [http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp\\_G\\_ADV4UN.html](http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp_G_ADV4UN.html)
- [4] Huei-Huang Lee: Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 12
- [5] <http://www.youtube.com/user/luwilk>