

FILIPEK Przemysław, PALINOWSKI Dawid, KAMIŃSKI Tomasz

SYSTEM PODWÓJNEGO BALANSU W KONSTRUKCJI JEDNOKOŁOWEGO ROBOTA

Streszczenie

Artykuł przedstawia projekt i budowę mechaniczną jednokołowego robota który utrzymuje równowagę za pomocą dwóch układów balansu: wzdłużnego i poprzecznego. Wzdłużny balans zrealizowano wykorzystując zmianę obrotów koła jezdnego, a balans poprzeczny uzyskano dzięki przesuwanej masie balansującej. Masą tą jest zespół akumulatorów zasilających. Wirtualną konstrukcję robota zamodelowano w programie NX, przeprowadzono analizę naprężeń MES a na podstawie dokumentacji 3D wykonano rzeczywistą konstrukcję mechaniczną korzystając z elementów stalowych i profili aluminiowych.

WSTĘP

Jednokołowe roboty wykorzystujące czujniki żyroskopowe w układach balansu powstają od początku XXI wieku. Najczęściej pełnią rolę doświadczalną lub służą do celów dydaktyki i nauki, ale istnieją również rozwiązania komercyjne, służące do transportu osób z nich korzystających. Temat pojazdów balansujących jednokołowych jest bardzo obszerny.

Elementem wykonawczym jest najczęściej koło jezdne lub dwa koła, lecz występują również rozwiązania z kulą. Pojazdy te działają na zasadzie odwróconego wahadła.

Balans układu można realizować nie tylko poprzez ruchy kołem, lecz również przez wychył masy bezwładnościowej. Takie rozwiązanie zostało zastosowane w systemie podwójnego balansu użytego w konstrukcji jednokołowego robota.

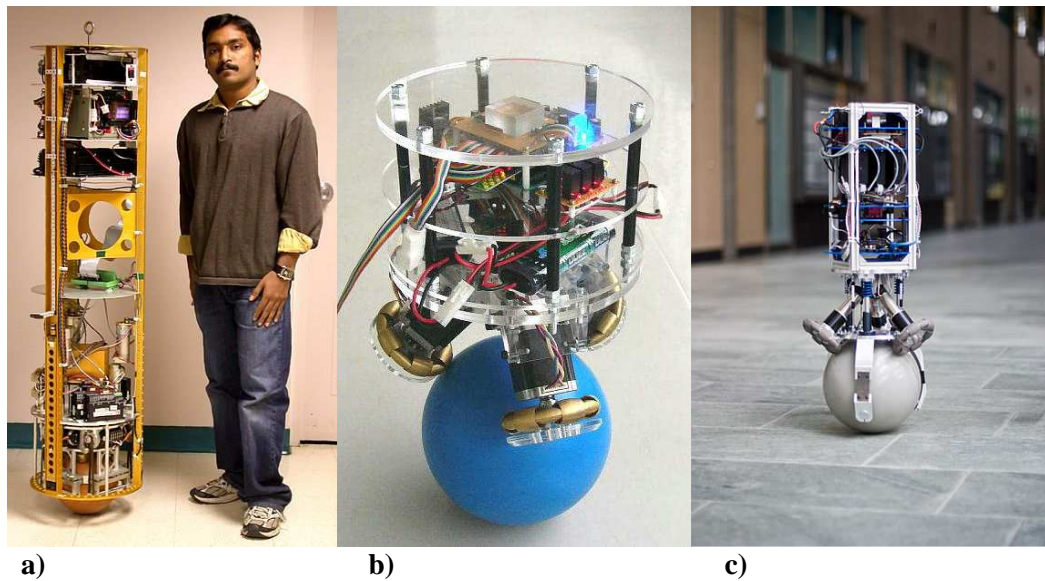
1. WSPÓŁCZESNE TRENDY KONSTRUKCYJNE W URZĄDZENIACH BALANSUJĄCYCH

1.1. Ballbot

Ballbot to dynamicznie stabilny, mobilny robot, który w miejscu tradycyjnego koła posiada kulę. Mechanizm ten bazuje na odwróconej kulce od myszki, gdzie napęd pochodzi od rolek. Dzięki takiemu zastosowaniu Ballbot jest w stanie poruszać się w dowolnie wybranym kierunku lub zawrócić w miejscu. Dodatkowo nie musi mieć nisko umiejscowionego środka ciężkości, przez co możliwe jest stworzenie konstrukcji o wysokości człowieka, co umożliwi swobodną interakcję. Dodatkowo podczas bezruchu Ballbot zużywa minimalną ilość energii. Robot ten czerpie energię z 48V akumulatora kwasowego, który umożliwi pracę nawet do 7 godzin.

Nad odpowiednim utrzymaniem pozycji wertykalnej czuwa system żyroskopów, przekazujący informacje do procesora Pentium o taktowaniu 200 MHz. Komunikacja z pojazdem została rozwiązana poprzez system 802.11b Wi-Fi. W myśl tej idei powstaje

wiele rozwiązań tego zagadnienia, które są realizowane przez konstruktorów z całego świata (rysunek 1) [10].



Rys. 1. Różne rozwiązania konstrukcji Ballbot [10]: a) The CMU Ballbot – prekursor i pierwszy sprawny model tego typu, b) The BallIIP – stworzony przez prof. Masaaki Kumagai w Japonii w 2008 roku, c) The Rezero – zbudowany przez ETH Zurich w Szwajcarii w 2010 roku

1.2. iBOT 3000 Mobility System

Następnym w kolejności, a zarazem pierwszym pojazdem genialnego konstruktora Deana Kamena jest *iBOT 3000 Mobility System* - jednoosobowy pojazd z napędem przypominający wózek inwalidzki (rysunek 2). Wynalazek ten był rewolucyjny w dziedzinie przewozu osób niepełnosprawnych.



Rys. 2. iBot 3000 Mobility System [11]

Elementem wyróżniającym go spośród innych tego typu pojazdów jest przede wszystkim możliwość wspinania się na schody, krawężniki oraz inne nierówności terenu. Taką możliwość uzyskano poprzez zastosowanie obrotowych osi, które w danej potrzebie potrafią ustawić się równoległe w pozycji wertykalnej. W takim ustawieniu za balans odpowiada system opierający się na efekcie żyroskopowym [11].

1.3. Honda U3-X

Kolejnym pojazdem, który wyróżnia się na tle pozostałych konstrukcji jest Honda U3-X (rysunek 3). Konstrukcja ta została zaprezentowana w 2009 roku na Tokio Motor Show. Magazyn Time określił U3-X jako jeden z 50 najlepszych wynalazków 2009 roku. Innowacją jest budowa koła odpowiedzialnego za poruszanie. Na obwodzie dużego koła zamontowano walce o osiach obrotu prostopadłych w stosunku do osi dużego koła, mogące się niezależnie poruszać (koło omnikierunkowe). Dzięki takiemu rozwiązaniu U3-X jest w stanie poruszać się w dowolnym kierunku. Do zalet zdecydowanie należy zaliczyć ergonomiczny kształt oraz dużą dowolność poruszania się. Zdecydowanym minusem jest krótki czas pracy na baterii litowo-jonowej sięgający 1 godziny oraz niska prędkość poruszania (ok. 6 km/h) [12].



Rys. 3. Honda U3-X [12]

1.4. Segway

Segway (rysunek 4) jest to jednoosobowy, dwukołowy pojazd dwuśladowy, jednoosiowy napędzany energią elektryczną z wbudowanych akumulatorów. Komputer pokładowy który również wbudowany jest w pojazd odpowiada za utrzymywanie równowagi, aby urządzenie nie przewracało się stojąc w miejscu lub w trakcie ruchu. Poprzez wychylenie tułowia kierującego pojazdem w przód lub w tył następuje ruch pojazdu w wybranym kierunku. Aby dokonać skrętu w prawo lub w lewo należy jedynie poruszyć drążkiem kierowniczym w odpowiednim kierunku.

System komputerowy pracuje na zaawansowanym oprogramowaniu sterującym. Oprogramowanie to monitoruje wszelkie informacje dotyczące położenia i stabilności, których dostarczają żyroskopy i kieruje działaniem silników elektrycznych. Silniki te, zasilane przez parę akumulatorów litowo-jonowych mogą poruszać każdym kołem niezależnie i z różnymi prędkościami, dzięki czemu możliwe jest zawrócenie pojazdu w miejscu [7].



Rys. 4. Segway i2 – poprawiona wersja, wypuszczona na rynek w 2006 roku [7]

Przy przechylaniu pojazdu do przodu, silniki poruszają obydwoma kołami do przodu, aby uniknąć upadku. Przy przechyleniu w tył silniki poruszają kołami wstecz. Jeśli kierujący poruszy drążkiem kierowniczym w lewo lub w prawo, silniki przyspieszają jedno z kół lub poruszają każdym kołem w innym kierunku [8].

1.5. Solowheel

Podobnym urządzeniem do Segwaya jest pojazd Solowheel (rysunek 5), wynalazek amerykańskiej firmy Inventis. Jest to przenośny pojazd o stosunkowo małych wymiarach, średnica koła wynosi 16". Platformę na której stał kierujący pojazdem w Segwayu tutaj zastępują dwa boczne, rozkładane pedały. Pojazd potrafi osiągnąć prędkość do 16 km/h. Akumulator ładuje się około 45 minut i pozwala na godzinę nieustannej jazdy. Sposób jego działania się i poruszania się jest analogiczny jak w Segwayu. Ruch w określonym kierunku możliwy jest dzięki wychyleniu tułowia w określoną stronę. Umożliwia to zespół żyroskopów zasilany 1000 W silnikiem. Solowheel różni się od Segwaya tym, że nie posiada drążka sterowniczego, co pozwala na prowadzenie pojazdu bez użycia rąk [6].



Rys. 5. Solowheel [6]

Wadami wymienionych urządzeń jest obsługa tylko w postawie stojącej, co wyklucza ich użytkowanie przez osoby starsze oraz osoby z chorym kręgosłupem. Ponadto do sterowania skretem niezbędny jest balans ciałem kierowcy – co również może sprawić trudności

niektórym użytkownikom. W przypadku Solowheela kierowca nie ma możliwości przytrzymania się rękoma np. w momencie utraty równowagi.

1.6. Ryno

Bardzo inspirującym przykładem komercyjnego pojazdu balansującego jest jednokołowy Ryno zbudowany w Portland w 2011 r. (rysunek 6). Ryno umożliwia jazdę na siedząco – podobnie jak na motorze. Jest to jednak jednokołowiec napędzany elektrycznie baterią litowo-żelazowo-fosforanową. Zasila ona silnik tarczowy znajdujący się w kole o rozmiarze 25". Ryno waży 57 kg i osiąga prędkość maksymalnie 40 km/h. Jego zasięg to 50 km. Pojazd ma niewielki promień skrętu mieszczący się w jednym metrze [9]. Na rynek wchodzi Ryno w wersji seryjnej z nieco gorszymi parametrami, jednak w porównywalnej cenie do prawdopodobnie największego swojego rywala – Segway'a.



Rys. 6. Ryno [9]

2. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Zadaniem robota „Żyrek” będzie samodzielne utrzymywanie stanu równowagi. Konstrukcja stalowa będzie stykać się z podłożem powierzchnią jedyne koła.

Robot będzie posiadał dwa silniki. Silnik prądu stałego będzie napędzał koło jezdne w taki sposób, aby zrównoważyć całą konstrukcję. Drugi silnik – krokowy będzie precyzyjnie sterował wysuwaniem prowadnicy z masą balansującą – akumulatorami tak, aby zachować równowagę poprzeczną. Całość robota będzie nadzorował mikroprocesor, który otrzymując informacje z trzyosiowego czujnika żyroskopowego z akcelerometrem, wysteruje z odpowiednim algorytmem dwa silniki napędowe.

Robot będzie funkcjonował w dwóch trybach pracy. Pierwszym trybem jest tryb postojowego utrzymywania równowagi. Silniki będą wykonywać minimalne ruchy aby utrzymać całą konstrukcję w miejscu i równowadze, przy możliwie jak najmniejszych wychyleniach. Drugi tryb odpowiada za utrzymanie równowagi całej konstrukcji pod wpływem zewnętrznych wymuszeń. Za takie wymuszenia można przyjąć między innymi popchnięcie robota ręką. Wtedy za pomocą koła i masy balansującej napędzanych oddzielnymi silnikami możliwe jest odzyskanie stanu równowagi.

Zakłada się, że sam korpus będzie ważył w przybliżeniu jeden kilogram. Wagę koła szacuje się na 0,5 kilograma. Część elektroniczna z akumulatorami powinna ważyć nie więcej niż 3 kilogramy. Wysokość robota wraz z zamontowanym już kołem przyjmuje się 0,5 metra. Maksymalny promień skrętu zależny jest od maksymalnego wysuwu prowadnicy z akumulatorem, który wyniesie 0,08 metra.

3. SYSTEM PODWÓJNEGO BALANSU

Jednym z głównych elementów odpowiedzialnych za zadanie utrzymania równowagi jest trzyosiowy czujnik żyroskopowy z akcelerometrem. Czujnik ten znajduje się w korpusie robota, przesyłając do mikroprocesora informacje o wychyleniu. Mikroprocesor uruchamia dwa silniki, prądu stałego i krokowy.

3.1. Balans wzdłużny

Silnik prądu stałego M36N-3E znajduje się w górnej części korpusu, tuż pod podstawą akumulatora [5]. Napęd koła robota, realizowany jest przez ten silnik za pomocą przekładni pasowej. Robot steruje obrotami koła, aby utrzymać równowagę w kierunku przód/tył. W momencie utraty równowagi w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu koła, za pomocą czujnika żyroskopowego, silnik otrzyma informację z mikroprocesora o kierunku i prędkości obrotowej. Dzięki temu możliwe będzie utrzymanie równowagi poprzez ruch koła w tym samym kierunku w którym robot ją utracił.

3.2. Balans poprzeczny

Układ balansu poprzecznego wykorzystuje dwa akumulatory 12 V/5 Ah jako masę balansującą na boki. Członem odpowiedzialnym za wysuwanie się akumulatorów jest silnik krokowy Astrosyn 17PM-K018-P9ST, umieszczony w podstawie wewnątrz korpusu [4]. Napęd z silnika przekazywany jest poprzez listwę zębatą zamocowaną pod podstawą. Listwa zębata zamocowana do prowadnicy powoduje jej przesunięcia wraz z zamocowanymi na niej akumulatorami – masą balansującą. Akumulatory wysuną się w przeciwną stronę do siły powodującej wychylenie (w momencie, gdy robot wyjdzie z położenia równowagi), w taki sposób, aby utrzymać stabilność. Odległość na jaką wysunie się prowadnica będzie zależeć od siły, z jaką urządzenie zostanie odchylone od pionu.

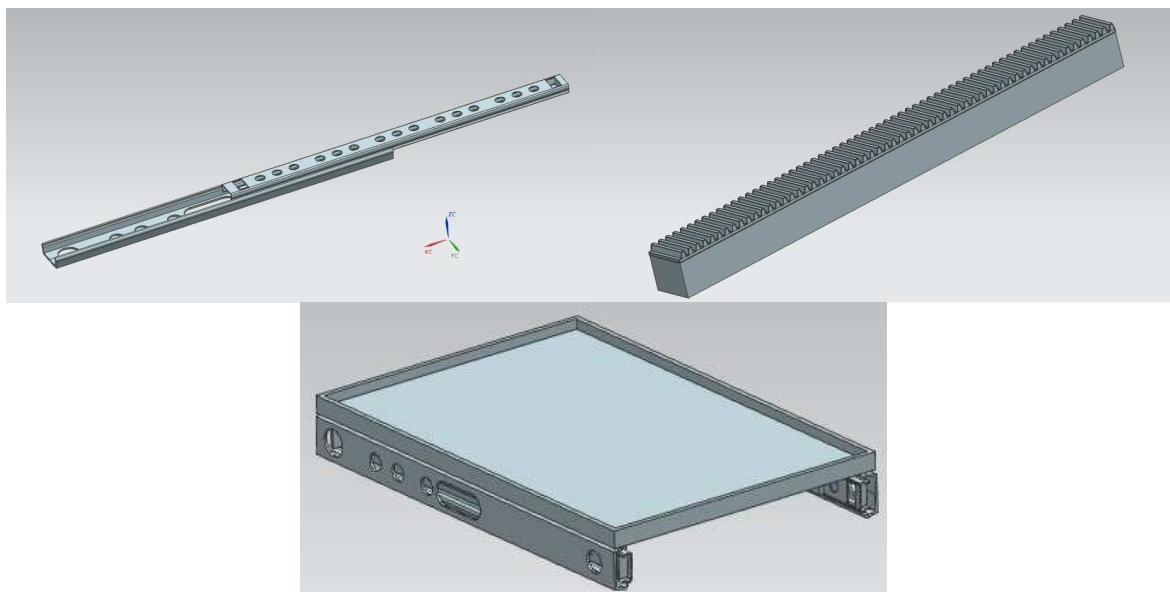
4. MODEL JEDNOKOŁOWEGO ROBOTA UTRZYMUJĄCEGO RÓWNOWAGĘ

4.1. Konstrukcja mechaniczna

Wszystkie rysunki podzespołów mechanicznych wykonane zostały w programie Siemens NX 7.5 Unigraphics, który jest zaawansowanym programem typu CAD/CAM/CAE, umożliwiającym projektowanie wyrobu parametrycznie lub nieparametrycznie, bryłowo lub powierzchniowo.

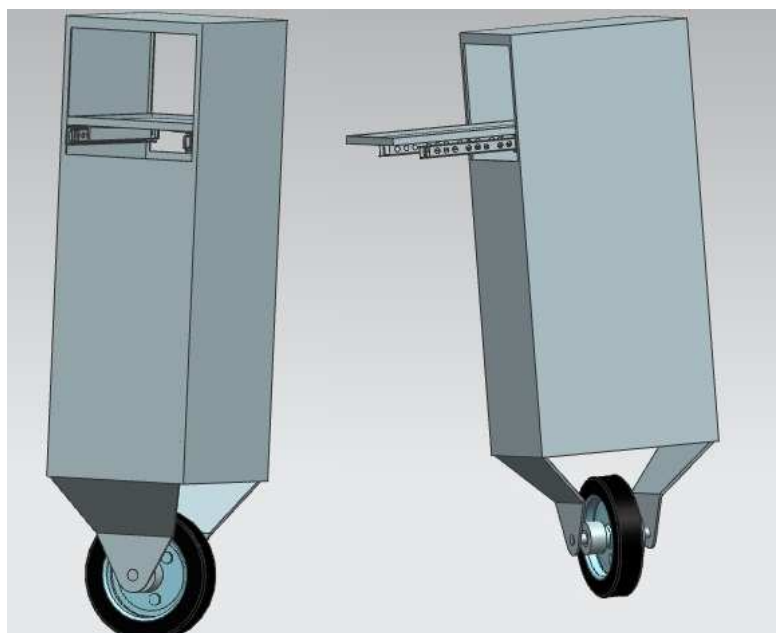
Do elementów konstrukcji mechanicznej należy zaliczyć: korpus, koło jezdne, wsporniki mocujące koło do korpusu, listwę zębatą oraz szyny suwające wraz z podstawą akumulatorów.

Prowadnica (rysunek 7b), której zadaniem jest wysuwanie akumulatorów jako masy balansującej, składa się z kilku części. Główną jej częścią jest podstawa, na której znajdują się akumulatory. Do podstawy, za pomocą kątowników przymocowana jest ruchoma część szyny suwającej (rysunek 7a). Nieruchoma część szyny została przytwierdzona śrubami do korpusu. Do podstawy od spodu przykręcona została listwa zębata (rysunek 7c), która realizuje napęd z silnika krokowego. Maksymalny wysuw prowadnicy po zamontowaniu wynosi 80 mm.



Rys. 7. Zamodelowane elementy: **a)** wysunięta szyna suwająca, **b)** prowadnica, **c)** listwa zębata

Po zaprojektowaniu wszystkich niezbędnych elementów konstrukcji mechanicznej przystąpiono do złożenia ich w całość (rysunek 8).



Rys. 8. Cała konstrukcja 3D z wysuniętą i schowaną prowadnicą

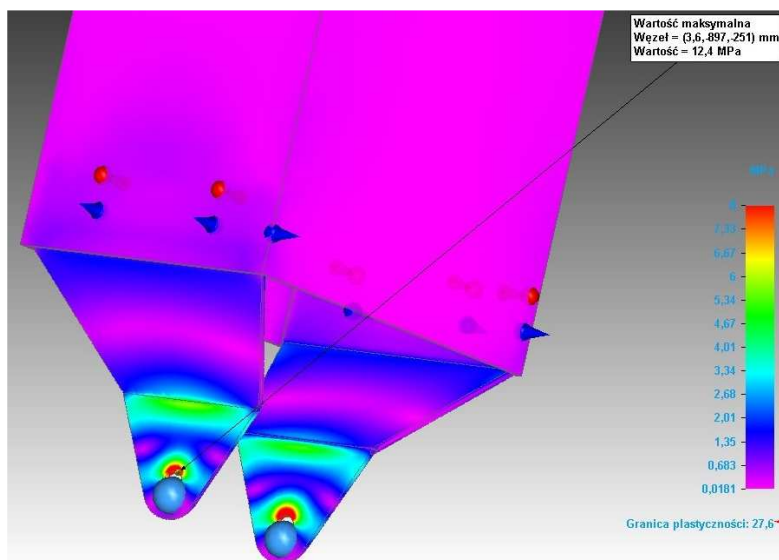
4.2. Obliczenia wytrzymałościowe

Na podstawie obliczeń, dla przyjętych wartości mas akumulatorów i innych podzespołów robota ustalono, że największa siła $P \approx 56 \text{ N}$ działa na oś koła przy maksymalnie wysuniętych akumulatorach.

Aby zaobserwować skutki działania maksymalnej siły (czyli całego ciężaru urządzenia) na oś koła, przeprowadzono analizę MES. Do analizy pozostawiono tylko niezbędne elementy, czyli korpus oraz wsporniki. Na model nałożono siatkę czworościenną o łącznej liczbie

elementów 142 641 i liczbie węzłów 244 654. Wskazany materiał to aluminium 1060. Siła działająca na korpus z góry wynosi w przybliżeniu 56 N.

Wyniki analizy naprężeń przedstawiono na rysunku 9, z którego można odczytać, że w miejscu mocowania koła jezdneho tuż nad otworem, dochodzi do spiętrzenia naprężeń o maksymalnej wartości – 12,4 MPa.



Rys. 9. Analiza naprężeń wsporników koła

Ponieważ granica plastyczności dla aluminium wynosi 27,579 MPa, a maksymalne naprężenie w analizowanym przypadku wynosi 12,4 MPa, w modelu występują znikome przemieszczenia, które po przeprowadzonej analizie przemieszczeń osiągają wartość 0,0715 mm.

4.3. Elementy elektroniczne

Zasilanie silników, czujnika żyroskopowego oraz procesora jest realizowane za pomocą dwóch akumulatorów żelowych AMG LMRA 12 V/5 Ah [1].

Elementem odpowiedzialnym za odczyt wychylenia korpusu i przesłanie tej informacji do mikroprocesora jest układ MPU-6050. Jest to płytka z gotowym i łatwym do uruchomienia modułem, którym jest scalony czujnik położenia względem Ziemi. Zawiera w sobie 3-osiowy akcelerometr i 3-osiowy żyroskop zapewniające szybki i stabilny pomiar położenia. Układ posiada też specjalizowaną jednostkę DMP (Digital Motion Processor) umożliwiającą sprzętowe przeliczanie danych z czujników na położenie urządzenia względem Ziemi. MPU-6050 komunikuje się z mikrokontrolerem za pomocą magistrali I²C [2].

Mikrokontrolerem zastosowanym przy budowie danego urządzenia jest ATMEGA16 firmy Atmel [3]. Zadaniem procesora jest gromadzenie informacji o położeniu od czujnika żyroskopowego. Na podstawie uzyskanej informacji, procesor steruje silnikiem krokowym odpowiedzialnym za balans masą i silnikiem prądu stałego odpowiedzialnym za ruch kołem jezdnym - w zależności od tego, w którą stronę nastąpiło wychylenie i o ile stopni od pionu.

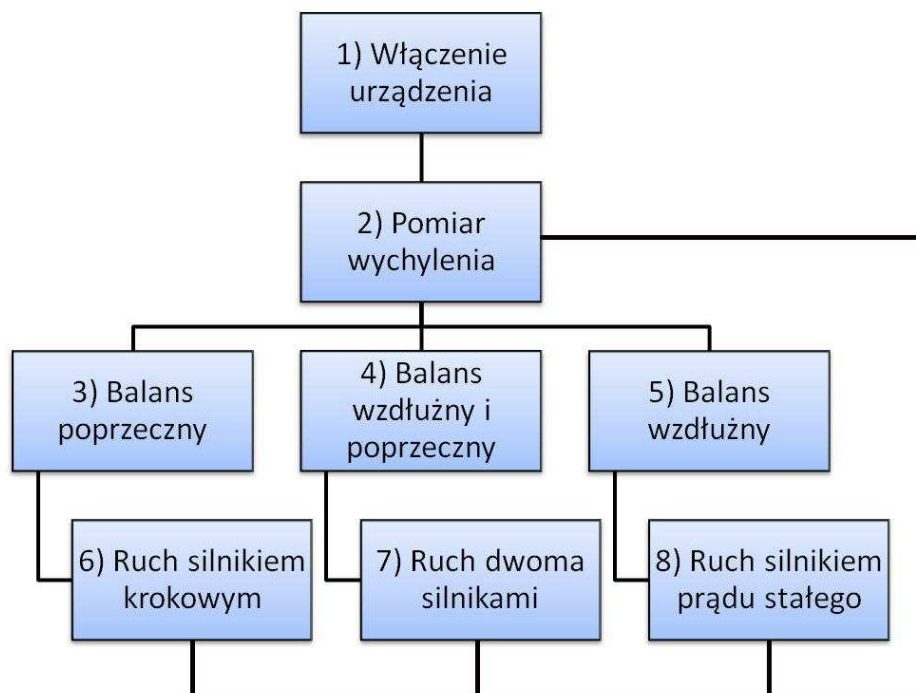
Zastosowanym silnikiem prądu stałego jest silnik firmy Mitsumi M36N-3E. Silnik jest odpowiedzialny za sterowanie kołem jezdnym. Napęd z wału przenoszony jest na koło pasowe za pomocą paska klinowego. Silnik otrzymuje informację z procesora, który na podstawie odchylenia korpusu oblicza, w którą stronę wał silnika ma się obracać.

Unipolarny silnik Astrosyn 17PM-K018-P9ST umieszczony jest pod podstawą akumulatora. Napęd na podstawę realizowany jest poprzez listwę zębatą. Zadaniem silnika

jest wysuwanie podstawy przez kwadratowe wycięcie w korpusie w jedną, bądź drugą stronę, w zależności od informacji z procesora.

4.4. Algorytm sterowania

Fragment algorytmu sterowania (rysunek 10) przedstawia sekwencje kroków i zachowań w pętli sprzężenia zwrotnego, jakie podejmuje procesor na skutek wymuszeń zewnętrznych lub ich braku.



Rys. 10. Fragment algorytmu sterowania robotem

5. WYKONANIE RZECZYWISTE KONSTRUKCJI

Całkowita wysokość robota wraz z kołem wynosi 535 mm.

Korpus urządzenia wykonany został z aluminium (rysunek 11a) poprzez wygięcie i cięcie blachy aluminiowej. Podstawa ma wymiary 180x130 mm a wysokość wynosi 400 mm. 10 mm od górnej krawędzi na ścianie równoległej do kierunku ruchu koła jeźdnego wykonane zostało kwadratowe wycięcie o wysokości 125 mm i szerokości 125 mm. Przez to wycięcie, na zamontowanej prowadnicy (rysunek 11b), szynach suwających i podstawie – zostanie umocowana masa balansująca w postaci akumulatorów. Grubość ścianek korpusu wynosi 2 mm.

Do dolnej części korpusu zamocowane zostało koło jezdne za pomocą dwóch wsporników wykonanych ze stali kwasoodpornej (rysunek 12). Grubość ścianek tych wsporników wynosi 3 mm. Wnętrze koła wykonane jest ze stali, powierzchnia toczna – z gumy. Jego średnica zewnętrzna wynosi 116 mm.

Na piaście koła z jednej strony zamocowano koło pasowe, na które za pomocą paska klinowego przekazywany jest napęd z silnika prądu stałego. Z drugiej strony zamontowano tuleję. Piaśta jest ułożyskowana, dodatkowo zamocowano tuleję łożyskową. Oś koła stanowi śruba, do której przymocowane są wsporniki, za pomocą których koło przytwierdzone jest do korpusu.



a) b) c)
Rys. 11. Fragmenty wykonanej konstrukcji: a) korpus, b) prowadnica, c) silnik krokowy z mocowaniem



Rys. 12. Wykonana konstrukcja mechaniczna robota z wysuniętą i wsuniętą prowadnicą

WNIOSKI

Projekt urządzenia składa się z części mechanicznej (wykonanej fizycznie) oraz części elektronicznej. Po zakończeniu prac nad robotem, dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu zawartemu w mikroprocesorze, będzie on samodzielnie utrzymywał stan równowagi. Spełnić to zadanie będą: układ balansu masy (wzdłużny) realizowany poprzez regulację obrotów koła jezdnego, oraz układ balansu masy (poprzeczny) – przy użyciu akumulatorów.

Projekt robota jest obecnie w trakcie realizacji w ramach prac koła naukowego ELMECH na Politechnice Lubelskiej. Część mechaniczna z zamontowanymi silnikami jest wykonana. Trwają prace nad elektronicznym układem sterowania.

BIBLIOGRAFIA

1. Akumulator żelowy, <http://allegro.pl/akumulator-zelowy-lmra-7-2ah-12v-zamiast-7-ah-fv-i2919984575.html>, (28.01.2013).
2. Czujnik żyroskopowy, <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Components/General%20IC/PS-MPU-6000A.pdf>, (28.01.2013).
3. Mikroprocesor, <http://www.pg.gda.pl/~zbczaja/pdf/atmega16mmr.pdf>, (28.01.2013).
4. Silnik krokowy, <http://www.eminebea.com/en/product/rotary/steppingmotor/hybrid/standard/data/17pm-k.pdf>, (28.01.2013).
5. Silnik prądu stałego, http://www.mitsumi.co.jp/latest/Catalog/pdf/motorav_m36n_3e_e.pdf, (28.01.2013).
6. Solowheel, <http://static.geekbeat.tv/wp-content/uploads/2011/02/SoloWheel.jpg>, (28.01.2013).
7. Zasada działania Segwaya, <http://www.segway.com.pl/na-co-dzien/sposob-dzialania>, (28.12.2012).
8. Zasada działania Segwaya, http://www.mt.com.pl/archiwum/03-2004_segway.pdf, (29.01.2013).
9. Zasada działania Ryno, <http://www.vincentabry.com/en/ryno-motors-1-wheel-electric-motorcycle-605>, (20.01.2013).
10. Zasada pracy Ballbot'a, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ballbot>, (20.01.2013)
11. Zasada pracy iBOT'a, <https://www.msu.edu/~luckie/segway/iBOT/iBOT.html>, (02.12.2012)
12. Zasada pracy U3-X, http://en.wikipedia.org/wiki/Honda_U3-X, (02.12.2012)

THE DUAL BALANCE IN THE DESIGN OF THE ROBOT 1-WHEEL

Abstract

This paper presents the design and construction of mechanical robot 1-wheel which maintains a balance with the two systems balance: longitudinal and transverse. The longitudinal balance was carried out using varying the speed of running wheel and lateral balance is achieved by sliding a weight balancing. The mass of the batteries powering the unit. Virtual design of the robot was modeled in NX, FEM stress analysis was performed and the documentation made real 3D mechanical design using steel and aluminum.

Autorzy:

dr inż. **Przemysław Filipek** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

inż. **Dawid Palinowski** – student studiów II stopnia Politechniki Lubelskiej

dr inż. **Tomasz Kamiński** – Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa