NAPĘDY I STEROWANIE W POJAZDACH JEDNOKOŁOWYCH – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ KONCEPCYJNYCH

DRIVE AND CONTROL SYSTEMS OF MONOWHEELS – REVIEW OF CONCEPTUAL SOLUTION

Adam Kochan, Rafał Chrząszczyk, *Politechnika Śląska*

Abstract

Presentation of a concept of an one-wheeled vehicles and a brief survey of present development stage is performed, describing basic problems and constraints involved in construction and operation of such vehicles. Mechanical-wise, monocycles and monowheels are the most basic form of a vehicle, hence present remarkable potential of becoming cheap and convenient form of transportation. Light weight and maneuverability are the qualities especially desirable in crowded urban environment. However current development stage of one-wheelers do not offer sufficient stability, performance and ease of operation for them to become serious contenders in the market of low range transportation. Hence new directions of development of a one-wheeled vehicle is proposed, both in propulsion system and in control methods.

Streszczenie

Najprostsza możliwa forma środka lokomocji skrótowo przedstawiona w tym artykule - pojazd jednokołowy - dzięki poręczności, niewielkiej masie i potencjalnie bardzo niskim kosztom produkcji, mogłyby się stać popularną formą transportu, szczególnie w środowiskach miejskich. Przy obecnym stanie rozwoju są one jednak zbyt trudne w obsłudze i cechują się słabymi osiągami. Zaproponowano zatem nowe drogi rozwoju, dające szansę na poprawienie atrakcyjności tej formy transportu.

1. Wstęp

Od zarania dziejów ludzkości towarzyszyły różnego rodzaju pojazdy kołowe. Były one konstruowane w celu transportu towarów i ludzi. Początkowo napędzane siłą mięsni ludzi lub zwierząt pociągowych. Z czasem pojazdy zostały wyposażane w napędy mechaniczne i w końcu elektryczne. Najprostsze, najtańsze konstrukcje są budowane w wykorzystaniem mniejszej ilości kół niż 3 (rowery, wózki, taczki). Względom ekonomicznym zawdzięczamy ich upowszechnienie. Najprostszą z możliwych konstrukcji jest pojazd jednokołowy - na przykład monocykl - najprostszy z możliwych pojazdów pod względem konstrukcji mechanicznej. Jednakże od kierowcy takiego pojazdu wymagana jest umiejętność stabilizacji układu pojazd - kierowca. Dodatkowa trudność polega na tym, że stabilność taką można uzyskać tylko w stanach dynamicznych - podczas poruszania się. Poruszanie się takim pojazdem jest bardzo widowiskowe i wymaga dużych umiejętności od kierowcy. Natomiast niewątpliwą zaletą pojazdu jest niska masa i niewielkie rozmiary. Wraz z rozwojem napędów elektrycznych zaczęto je stosować we wszelkiego rodzajach pojazdach w tym w pojazdach jednokołowych. Konstrukcje tego typu dają szerokie spektrum zagadnień do rozpatrzenia. Wyzwaniem stają się: konstrukcja napędu, układu sterowania i stabilizacji pojazdu, zasilania oraz gdy jest to wymagane - zapewnienie autonomiczności.

2. Rozwiązania konstrukcyjne

Znakomitą większość typów budowy pojazdu jednokołowego można sprowadzić do dwóch kategorii - monocyklu (ang. unicycle), oraz „jednokołowca", czy też „monokoła" (ang. monowheel). Pierwsza kategoria obejmuje pojazdy, w których koło jest niezależnym elementem konstrukcji, a pasażer lub ładunek znajduje się ponad kołem. Środek ciężkości podczas jazdy znajduje się najczęściej ponad osią koła. Konwencjonalne unicykle napędzane są siłą mięśni kierowcy, a sterowanie i balans zapewnia umiejętne przenoszenie masy ciała kierowcy. Jest to kategoria najbardziej powszechna, doczekała się więc największej liczby

realizacji. Przykładowe realizację unicykli przedstawione zostały na rys. 1.

Rys. 1 Przykłady unicykli, od lewej, klasyczny [1], robot [2], prototypowy BRP Embrio
Fig.1. Exemplary unicycles, from left: conventional, robotic, prototype of BRP Embrio

Drugie rozwiązanie (rys. 2) opiera się na koncepcji składającej się jedynie z koła, wewnątrz którego znajduje się napęd oraz pasażer lub załadunek. Koncepcja ta powstała, podobnie jak unicykl, w XIX wieku, pojawiając się od tego czasu w literaturze popularno-naukowej oraz w postaci coraz bardziej nowoczesnych rozwiązań praktycznych.

Rys.2 Rocket Roadster Monocycle Kerry'ego McLean
Fig.2 Kerry McLeans Rocket Roadster Monocycle
Source: http://www.mcleanmonocycle.com

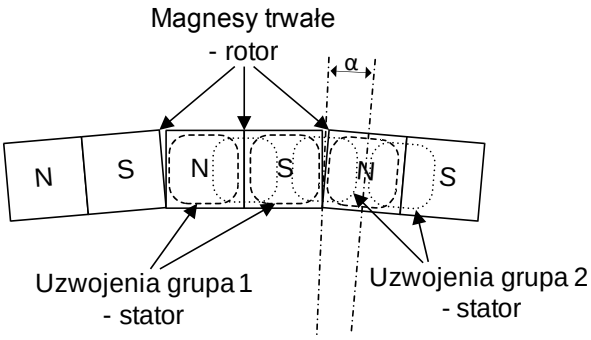
Zaletą takiego rozwiązania jest nisko umieszczony środek ciężkości, co znacząco może poprawić stabilność takiego pojazdu. Potencjalny zysk można uzyskać również w bezpieczeństwie pasażera takiego pojazdu. Ze względu na duże rozmiary, monokoło jest mniej poręczne i droższe w produkcji od unicykla. Wstępne plany rozwoju projektu przewidują konstrukcję zbliżoną do unicykla, lecz wraz z rozwojem prac, niewykluczone, że zbadane zostaną możliwości konstrukcji monokoła.

4. Układ napędowy

Przegląd istniejących pojazdów jednokołowych zwraca uwagę na problem zapewnienia pojazdowi odpowiedniego układu napędowego. Dotychczasowe konstrukcje napędzane są w oparciu o siłę nóg pasażera, silniki elektryczne, rozwiązania hybrydowe pedały – silnik elektryczny (przykładowo w [3]), oraz rzadziej z wykorzystaniem silników spalinowych.

Układ napędowy, oprócz wprawiania pojazdu jednokołowego w ruch, powinien mieć możliwość utrzymywania stabilności pojazdu. Do tego celu niezbędny jest zapewnienie odpowiedniego momentu napędowego z wymaganą dynamiką. Ze względu na specyfikę pojazdu zastosowany silnik elektryczny powinien w prosty sposób zapewniać obie funkcje (poruszać, napędzać pojazd oraz zapewniać stabilność w kierunku przód - tył).

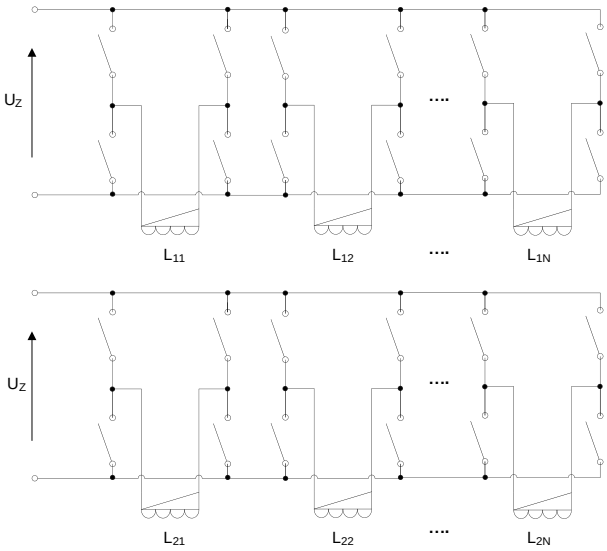
Można tu zaproponować nowatorską konstrukcję silnika tarczowego, która niejako zawiera w swej budowie dwa silniki elektryczne z których każdy odpowiada jednej z funkcji. Proponowane rozwiązanie to silnik składający się z obrotowej tarczy i umieszczonych na niej magnesów trwałych (Rys. 3). Stator silnika będzie wyposażony w 2 zespoły uzwojeń. Pierwszy z nich będzie odpowiedzialny za wytwarzanie momentu napędowego do wprawienia pojazdu jednokołowego w ruch, a drugi za zapewnienie stabilności pojazdu.



Rys. 3 Ułożenie magnesów rotora oraz uzwojeń statora silnika tarczowego

Fig. 3 Rotor and stator magnets alignment

Oba zespoły uzwojeń będą oddziaływały na te same magnesy trwałe w tarczy silnika, z tym że każdy z zespołów będzie zasilany z niezależnego falownika, elektronicznego komutatora. Skutkiem umieszczenia uzwojeń od poszczególnych funkcji silnika na jednakowym promieniu będzie sprzężenie magnetyczne pomiędzy poszczególnymi zespołami. Aby zminimalizować to zjawisko zespoły uzwojeń można przesunąć między sobą o kąt α. By zapewnić maksymalną niezależność sterowania oboma zespołami uzwojeń, każda z cewek w poszczególnym zespole będzie miała wyprowadzone oba końce - brak punktu wspólnego uzwojeń. Dodatkowo każdy z zespołów zostanie zasilony z dedykowanego falownika których stopień mocy będą stanowiły tranzystorowe mostki typu H (Rys.4).



Rys. 4 Koncepcja niezależnego zasilania niezależnych grup uzwojeń silnika tarczowego

Fig. 4 Independent power supplies of phase windings of disk motor

Zaproponowane rozwiązanie napędu daje duże możliwości pod względem niezależności sterowania silnikiem elektrycznym, który jednocześnie pełni dwie funkcje i jest wymagana przy rozpatrywaniu napędu elektrycznego do poruszania oraz stabilizacji pojazdu jednokołowego. Podana wyżej propozycja zostanie poddana analizie w środowiskach symulacyjnych oraz będzie zoptymalizowana. Po uzyskaniu zadowalających wyników symulacyjnych, rozwiązanie zostanie zrealizowane praktycznie i poddane badaniom na stanowisku laboratoryjnym. Ponieważ jest to jeden z pierwszych etapów budowy pojazdu jednokołowego na stanowisku laboratoryjnym będą badane wyłącznie: napędzanie oraz utrzymywanie stabilności w kierunku tył-przód.

5. Modelowanie i sterowanie

Problem sterowania pojazdem jednokołowym obejmuje zmianę prędkości i kierunku poruszania się pojazdu, utrzymywanie balansu przód-tył oraz równowagi poprzecznej. W tradycyjnych rozwiązaniach wszystkie wspomniane zadania wykonuje człowiek, mając do dyspozycji jedynie pedały oraz masę swojego ciała. Wykorzystanie silników elektrycznych oraz odpowiednich mechanizmów i algorytmów sterowania, może ułatwić kierowcy zadanie, przejmując część obowiązków. Dotychczasowe prace nad tematem, w przypadku pojazdów kierowanych przez człowieka, często skupiały się jedynie na napędzaniu pojazdu i utrzymywania równowagi przód-tył. Rozwiązania wykorzystywane w tym celu opierają się najczęściej na bardzo szybkich zmianach wartości i/lub kierunku momentu obrotowego podawanego na koło. Proponowana droga rozwoju, obejmuje wykorzystanie podwójnego silnika, w celu poprawienia osiągów, komfortu jazdy i żywotności silnika.

Próby stabilizacji również wychyleń na boki, częściej spotykane były w urządzeniach bezzałogowych. Opublikowane rozwiązania opierały się na efekcie żyroskopowym, jako element wykonawczy wykorzystując koło zamachowe lub reakcyjne.

Sterowanie w zdecydowanej większości przypadków odbywało się zgodnie z wartością wyznaczoną poprzez regulatory PID [4] lub LQR [2][5] opartą o sygnały z sensorów żyroskopowych, akcelerometrów i enkoderów. Pojazd jednokołowy jest systemem nieliniowym, poszczególne wartości są ze sobą silnie sprzężone i z perspektywy pojedynczej wartości, jak prędkość czy odchylenie, niestacjonarne. Zatem używane dotychczas liniowe regulatory, mogły spełniać swoją rolę gdy ich dobór oparty był na linearyzacji wokół pewnych punktów pracy. Nieliniowości te kompensowano adaptacją typu Gain Scheduling lub stosując regulatory rozmyte.

Do poprawnego zaprojektowania układu sterowania, należy wpierw dobrze poznać sterowany obiekt, tworząc jego model matematyczny.

W najprostszej postaci, adresując problemy zmiany prędkości oraz utrzymywania równowagi przód-tył, pojazd można przedstawić jako przypadek odwróconego wahadła. Układ taki jest traktowany wtedy jako dwuwymiarowy, a w przestrzeni kątów RPY, modelowana jest jedynie oś obrotu P

(nachylenia). Układ regulacji dla tak sformułowanego problemu, zapewnia stabilizację przód-tył i łatwe sterowanie prędkością pojazdu.

Przeniesienie problemu do przestrzeni trójwymiarowej, umożliwia opis pełnego zakresu ruchu pojazdu jednokołowego, wraz z osiami obrotu R oraz Y, a następnie stworzenie układu regulacji stabilizującego pozycję lewo-prawo i pozwalającego na skręcanie pojazdem.

W wykonywanym projekcie badawczym pierwszym celem jest wykonanie modeli matematycznych oraz układów regulacji dla przypadku odwróconego wahadła, następnie model ten zostanie rozbudowany do trójwymiarowego obiektu nieholonomicznego.

Podjęta zostanie próba utworzenia modeli traktujących pojazd jako manipulatora o określonej poprzez założenia upraszczające liczbie stopni swobody. Równolegle podczas prac nad napędem i jego przeniesieniem, modelowana będzie jego dynamika.

Nowatorskim podejściem tej pracy, będzie próba wykorzystania w regulacji mechanizmów identyfikacji modeli parametrycznych, których struktura zostanie ustalona przy pomocy wcześniej omawianych modeli matematycznych. Przebadane zostaną modele umożliwiające regulację predykcyjną oraz minimalnowariancyjną jak również podjęta zostanie próba utworzenia adaptacyjnego układu filtracji feedback- feedforward z wykorzystaniem filtrów FIR i pochodnych algorytmu LMS.

Celem proponowanych modyfikacji jest kompensacja wpływu niestacjonarności obiektu poprzez adaptację, zbadanie możliwość założenia dynamiki dochodzenia do wartości zadanej w regulacji predykcyjnej, wykorzystanie potencjalnego zysku stabilności pracy oferowanej przez regulator minimalnowariancyjny, czy prędkości reakcji dzięki filtracji.

6. Podsumowanie

Autorzy dostrzegają możliwości rozwoju idei pojazdów jednokołowych, poprzez wykorzystanie nowatorskiego układu napędowego oraz zastosowanie zaawansowanych technik regulacji. Na drodze symulacyjnej oraz docelowo eksperymentalnej przebadane zostaną niestosowane dotąd w tej dziedzinie rozwiązania. Celem nadrzędnym pracy będzie stworzenie prostego w sterowaniu pojazdu jednokołowego, o poprawionym bezpieczeństwie i komforcie, będącego nie tylko formą rozrywki ale również poważną alternatywą dla istniejących form transportu w środowisku miejskim.

Literatura

1.http://pl.wikipedia.org/wiki/Rower_jednokołowy

2. Jaeoh Lee, Seongik Han, and Jangmyung Lee, *Decoupled Dynamic Control for Pitch and Roll Axes of the Unicycle Robot*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.PP, no.99, pp.1, 2012

3. Pang-Chia Chen; Guan-Ru Li; Sun-Li Wu; Shyue-Bin Chang, *A unicycle device with human/electric hybrid power drive and longitudinal attitude control*, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2012

4. Hongzhe Jin, Jongmyung Hwang, and Jangmyung Lee, *A Balancing Control Strategy for a One-Wheel Pendulum Robot Based on Dynamic Model Decomposition: Simulations and Experiments*, IEEE TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 16, NO. 4, 2011

5. Kadam, S.N., Seth B., *LQR Controller of One Wheel Robot stabilized by Reaction Wheel Principle*, 2nd International Conference on Instrumentation Control and Automation, 2011

6. M.Z. Ab Rashid, S.N. Sidek, *Dynamic Modeling and Verification of Unicycle Mobile Robot System*, 2011 4th International Conference on Mechatronics (ICOM), 17-19 May 2011

Mgr inż. Rafał Chrząszczyk

Politechnika Śląska
Katedra Mechatroniki
ul. Akademicka 10a
44-100 Gliwice

email: rafal.chrzaszczyk@gmail.com

Mgr inż. Adam Kochan

Politechnika Śląska
Katedra Mechatroniki
ul. Akademicka 10a
44-100 Gliwice

email: adamkochan@g.pl