

The potential influence of hybrid and electric drivetrains on vehicle's motion direction

Abstract: The paper indicated that hybrid and electric drivetrains, besides its well known ecological values, are particularly advantageous for designing advanced systems of wheel control, which influence the direction of vehicle's motion (Torque Vectoring). Starting from the description of complex systems meant for combustion engine powered vehicles, it was stated that when wheels are propelled by electric motors, realization of such system is simpler. The basic types and examples of such designs were reviewed; and their structure, associated issues and limitations were emphasized. The summary underlined the importance of this aspect of electric motor propulsion, which translates into improved active safety of vehicles.

Keywords: *vehicle's drivetrains, hybrid and electric propulsions, propulsion control*

Możliwości hybrydowych i elektrycznych układów napędowych w oddziaływaniu na kierunek ruchu pojazdu

Streszczenie: W artykule wskazano, że napędy hybrydowe i elektryczne, oprócz znanych walorów ekologicznych, są szczególnie korzystne do budowania zaawansowanych systemów sterowania napędem kół, które wpływają na kierunek ruchu pojazdu (Torque Vectoring). Wychodząc od opisu złożonej budowy takich systemów w pojazdach napędzanych silnikiem spalinowym stwierdzono, że w przypadku napędzania kół silnikami elektrycznymi, realizacja funkcji takiego systemu jest prostsza. Omówiono zasadnicze rodzaje i przykłady takich konstrukcji, uwypuklając różnice w ich strukturze oraz występujące problemy i ograniczenia. W podsumowaniu podkreślono ważność tego aspektu napędzania kół silnikami elektrycznymi, co przekłada się na poprawę bezpieczeństwa czynnego pojazdów.

Słowa kluczowe: *układy napędowe pojazdów, napędy hybrydowe i elektryczne, sterowanie napędem*

1. Wstęp

Celowość wprowadzania hybrydowych lub elektrycznych układów napędowych do pojazdów najczęściej jest uzasadniana względami ekologicznymi. Wymienia się wiele korzyści stosowania takich układów, jak: zmniejszenia zużycia paliwa, ograniczenie lub całkowite wyeliminowanie emisji toksycznych spalin oraz zmniejszenie hałasu, które znacząco zmniejszają szkodliwe oddziaływania pojazdów na środowisko naturalne.

Stosunkowo rzadko wskazuje się na nowe ważne możliwości pojazdów o takim rodzaju napędu w zakresie kierowności i dynamiki poprzecznej, co wynika ze stosowania zwykle innej struktury układu napędowego niż w konstrukcjach z silnikiem spalinowym. Te sygnalizowane nowe walory można głównie uzyskać w przypadku stosowania układów napędowych z silnikami elektrycznymi, które indywidualnie napędzają lub wspomagają napędzanie poszczególnych kół pojazdu. Idea indywidualnego napędzania kół przy użyciu silników elektrycznych umieszczonych w kołach lub przy kołach jest znana od bardzo dawna. Przedstawiony na rysunku 1 samochód Lohner-Porsche z 1899 roku [9] miał silniki elektryczne zamontowane w przed-

nich kołach. Jednak w tamtym czasie, z powodu braku zaawansowanych systemów sterowania silnikami elektrycznymi, nie było możliwości w pełni wykorzystać możliwości, jakie stwarzał tego typu układ napędowy.

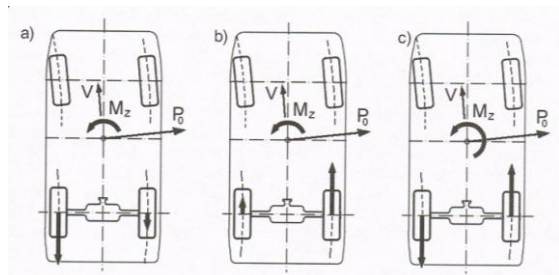


Rys. 1. Samochód Lohner-Porsche z silnikami elektrycznymi w kołach przednich [9]

W późniejszym okresie, zdominowanym przez pojazdy napędzane silnikami spalinowymi i praktycznie trwającym do dziś, podejmowano próby zbudowania układów napędowych, które

mogłyby napędzać pojazd niesymetrycznie i przez to wpływać na jego kierunek ruchu. Niesymetryczność napędzania oznacza nierówność sił podłużnych na kołach po lewej i prawej stronie pojazdu lub osi przedniej i tylnej, przy czym konieczne jest, aby ich wzajemne proporcje mogły się zmieniać w szerokim zakresie w sposób ciągły i również, co do znaku.

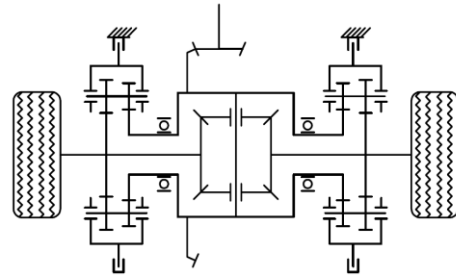
Ideę i współcześnie możliwe sposoby oddziaływania na kierunek ruchu pojazdu przy użyciu sił napędowych lub hamujących przedstawia rysunek 2 [4,5]. Dla uproszczenia rozważań ograniczono się do pokazania różnicowania sił podłużnych tylko na kołach osi tylnej.



Rys. 2. Możliwe sposoby generowania momentu M_z oddziałującego na tor jazdy: a – przez różnicowanie sił hamujących, b – przez różnicowanie sił napędowych, c – przez równoczesne generowanie siły napędowej i hamującej

Schemat (a) przedstawiono dość szeroko dzisiaj stosowany system stabilizacji toru jazdy ESP (Electronic Stability Control), w którym zakładane cele osiąga się przez różnicowanie wyłącznie sił hamujących na lewym i prawym kole. Mimo potwierdzonych korzyści stosowania tego systemu, przejawiających się głównie w podniesieniu bezpieczeństwa czynnego, trzeba zauważyć, że pogarsza on sprawność przeniesienia napędu i dynamikę podłużną samochodu. Układ napędowy według schematu (b), oparty na wykorzystaniu sił napędowych, jest już wolny od wymienionych wad, jednak w przypadku stosowania jednego silnika napędowego, jest trudny w technicznej realizacji. Największe możliwości generowania dużej wartości momentu M_z stwarza układ ze schematu (c), jednak z podobnym zastrzeżeniem jak w przypadku schematu (b).

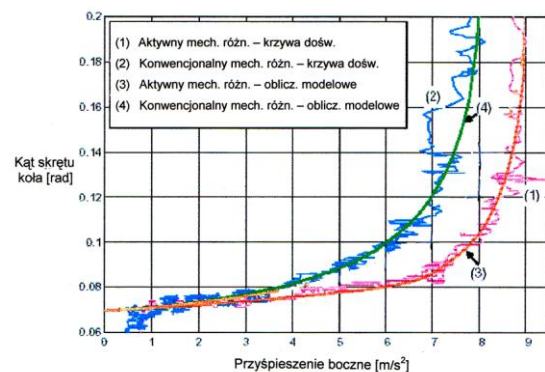
Przy stosowaniu jednego źródła napędu w postaci silnika spalinowego realizacja układów według schematów (b) i (c) rysunku 2 wymaga stosowania bardzo zaawansowanych mechanizmów rozdziału mocy i spotykana jest jedynie w drogich samochodach osobowych lub sportowych. Opracowane układy tego typu najczęściej nazywane są aktywnymi mechanizmami różnicowymi lub systemem Torque Vectoring. Na rysunku 3 przedstawiono schemat kinematyczny tylnego mostu napędowego samochodu BMW X6 z aktywnym mechanizmem różnicowym [2].



Rys. 3. Mechanizm różnicowy tylnego mostu samochodu BMW X6 [2]

Schemat nie oddaje pełnej złożoności układu, dlatego warto dodać, że składa się on z prostego symetrycznego mechanizmu różnicowego, dwóch bocznych planetarnych przekładni przyspieszających, dwóch wielotarczowych hamulców włączających te przekładnie do pracy oraz dwóch silników elektrycznych sterujących hamulcami. Podczas ruchu samochodu aktywne mogą być jedynie zespoły umieszczone po jednej stronie mechanizmu różnicowego. Cały układ jest dość skomplikowany i drogi, dodatkowo wymaga zewnętrznego sterowania elektronicznego działającego w oparciu o sygnały z wielu czujników określających parametry ruchu pojazdu.

Przykładowy efekt działania systemu Torque Vectoring, według badań włoskich, przedstawia rysunek 4 [1,3].

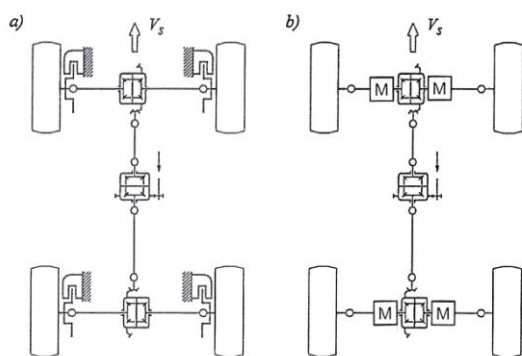


Rys. 4. Charakterystyki sterowności samochodu z tylnym aktywnym mechanizmem różnicowym podczas jazdy po okręgu $R_s = 40$ m na przyczepnej nawierzchni [1,3]

Wynika z niego, że samochód wyposażony w taki system w tylnym moście napędowym może osiągnąć przyspieszenie poprzeczne większe o $1 m/s^2$ w tych samych warunkach przyczepności i przy takim samym skręcie koła kierownicy w stosunku do samochodu z konwencjonalnym mechanizmem różnicowym. W praktyce oznacza to, że samochód może z większą prędkością poruszać się po określonym łuku, zarówno w warunkach testu jak i w innych sytuacjach drogowych.

2. Realizacja systemów Torque Vectoring w układach napędowych zawierających silniki elektryczne

Jak już wcześniej wspomniano różnicowanie sił podłużnych na kołach po lewej i prawej stronie pojazdu może być ułatwione w układach napędowych z silnikami elektrycznymi. Na rysunku 5 przedstawiono schematy dwóch wariantów sterowania siłami obwodowymi na kołach pojazdu z silnikiem spalinowym o permanentnym napędzie typu 4x4, zawierającym trzy symetryczne mechanizmy różnicowe.



Rys. 5. Możliwości korygowania sił podłużnych na kołach w permanentnym układzie napędowym typu 4x4: a – przy użyciu indywidualnie sterowanych hamulców kół (napęd tylko silnikiem spalinowym), b – przez dodatkowe silniki elektryczne (napęd hybrydowy)

Wariant z rysunku 5a ilustruje układ wykorzystujący indywidualnie sterowane hamulce kół do korygowania wartości sił napędowych lub generowanie sił hamujących. Tego typu systemy są współcześnie szeroko dostępne i najczęściej określane jako systemy zapobiegające poślizgowi kół przy napędzaniu (ASR – Anti-Schlupf Regulierung) lub wspomniany już układ stabilizacji toru jazdy ESP. Natomiast na rysunku 5b przedstawiona jest już koncepcja systemu hybrydowego, opracowana i rozwijana przez niemiecką firmę IAV [6,10]. Dodatkowo zastosowane cztery silniki elektryczne na półosiach napędowych w pobliżu przekładni głównych obydwu mostów, umożliwiają kilka stanów pracy całego układu. Warto zauważyć, że uwzględniając tylko pracę silnika spalinowego oraz mechanizmów przeniesienia i rozdziału napędu, siły napędowe będą równej wartości na wszystkich kołach. Analizując zaś pracę całego hybrydowego układu napędowego możliwe są następujące zasadnicze stany pracy:

- jazda przy napędzaniu wyłącznie silnikiem spalinowym,
- jazda przy napędzaniu wyłącznie silnikami elektrycznymi,

- jazda z równoczesnym napędzaniem silnikiem spalinowym i silnikami elektrycznymi (tryb pracy hybrydy równoległej),

- jazda z różnicowaniem przy użyciu silników elektrycznych momentów obrotowych na kołach lewych i prawych oraz przednich i tylnych.

Ten ostatni stan może być podyktowany zapewnieniem dobrych właściwości trakcyjnych (dopasowanie sił napędowych do sił przyczepności kół) lub realizacją ważniejszego celu, za jaki się zwykle uważa oddziaływanie na kierunek ruchu pojazdu. To różnicowanie wyjściowych momentów napędowych półosi może odbywać się w zakresie wartości dodatnich jak i ujemnych momentów obrotowych silników elektrycznych. W tym drugim przypadku, występującym w fazach intensywnego działania systemu, możliwy jest bezpośredni przepływ energii elektrycznej pomiędzy silnikami. Na rysunku 6 przedstawiony jest mechanizm różnicowy i jeden boczny silnik elektryczny w przykładowej konstrukcji tylnego mostu napędowego [6,10].

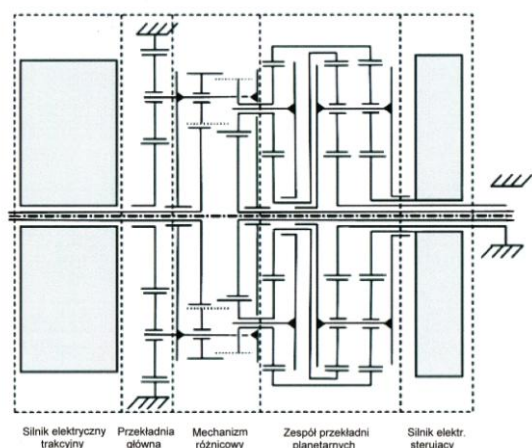


Rys. 6. Fragment mostu napędowego z mechanizmem różnicowym i jednym bocznym silnikiem elektrycznym połączonym z półosią

Podane parametry techniczne to: moc 30 kW i moment obrotowy 350 Nm w punkcie pracy odpowiadającym prędkości jazdy $v = 85 \text{ km/h}$. Pozwala to wytworzyć maksymalną różnicę momentów obrotowych na półosiach o wartości 700 Nm. Oprócz spodziewanych zalet opracowanego systemu wynikających z jego struktury hybrydowej oraz zastosowania czterech silników elektrycznych, dodatkowo zwraca się uwagę na ciągłość przekazywania napędu na koła, czyli brak przerw w napędzaniu pojazdu spowodowanych np. zmianą przełożeń w skrzyni biegów. Jednak wglębiając się w zaproponowany przez IAV układ można dopatrzeć się dość istotnych wad. Zamontowane na półosiach napędowych silniki elektryczne muszą pracować przy stosunkowo małych prędkościach obrotowych, za to są obciążone dużymi momentami obrotowymi. Silniki o narzuconych takich parametrach pracy charakteryzują się złymi wskaźnikami, na przykład stosunkiem mocy do masy, a więc są duże i ciężkie.

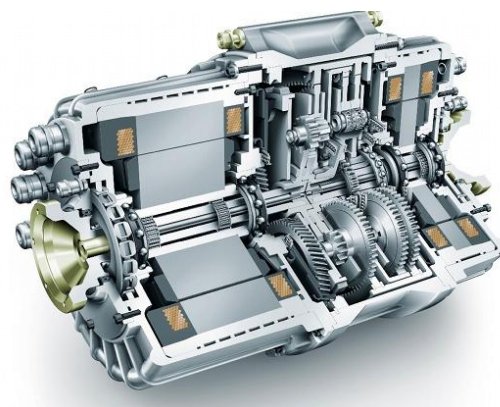
Dodatkowo realizacja kierunkowego napędzania pojazdu (funkcja systemu Torque Vectoring) wymaga ciągłego sterowania dużymi mocami elektrycznymi, co stanowi trudne zadanie dla elektronicznych sterowników.

Na tle przedstawionego przykładu ważnym dokonaniem w rozwoju układów napędowych z silnikami elektrycznymi wydaje się rozwiązanie firmy Schaeffler określane jako zintegrowany elektryczny zespół napędowy z funkcją elektrycznie sterowanego mechanizmu różnicowego (tzw. e-Differential system). Na rysunku 7 [7,8] przedstawiony jest schemat takiego zespołu napędowego.



Rys. 7. Schemat elektrycznego zespołu napędowego z elektrycznie sterowanym aktywnym mechanizmem różnicowym (Schaeffler active eDifferential)

Z lewej strony jest widoczny silnik trakcyjny (synchroniczny silnik elektryczny o mocy od 30 do 90 kW - zależnie od przeznaczenia), zaś z prawej strony silnik do różnicowania momentów obrotowych na półosiach napędowych (synchroniczny silnik elektryczny o mocy około 5 kW). Mimo wizualnej złożoności budowy układu, jego zasada działania jest dość prosta. Polega na doprowadzeniu przez zespół przekładni planetarnych do wirujących satelitów walcowego mechanizmu różnicowego dodatkowego momentu obrotowego od silnika sterującego w wyniku, czego osiąga się regulację rozdziału sił napędowych na lewą i prawą półoś. Bardzo ważną zaletą tego systemu jest to, że do realizacji funkcji kierunkowego napędzania samochodu wystarczy sterowanie jednym silnikiem o stosunkowo niedużej mocy. Różnica momentów obrotowych na lewej i prawej półosi może osiągnąć wartość nawet 2000 Nm. Na rysunku 8 przedstawiono widok (z wycięciami) takiego zespołu.



Rys. 8. Widok elektrycznego zespołu napędowego działającego według schematu z rysunku 7

Przykładowe parametry techniczne zespołu napędowego o mocy 80 kW to średnica 340 mm, długość 560 mm i masa 143 kg. Zespoły takie mogą być zabudowane: w tylnym moście, w przednim moście albo w obu równocześnie. W tym ostatnim przypadku powstaje pojazd elektryczny z układem napędowym typu 4x4 o szczególnych możliwościach w sterowaniu kierunkiem ruchu, ponadto o bardzo dobrych właściwościach trakcyjnych (wysokiej zdolności napędowej) i dużej dynamice podłużnej. Prace badawcze nad tym systemem są bardzo zaawansowane. Konstrukcja opracowanego układu jest chroniona przez około 100 zgłoszeń patentowych w większości państw o rozwiniętym przemyśle motoryzacyjnym. W 2014 roku przewiduje się rozpoczęcie produkcji seryjnej tego zintegrowanego elektrycznego zespołu napędowego.

3. Uwagi końcowe

Przedstawione przykłady konstrukcji układów napędowych pojazdów z silnikami elektrycznymi przekonują, że stwarzają one nowe możliwości w stosunku do rozwiązań wykorzystujących do swojego napędu jedynie silnik spalinowy. Uwypuklona w artykule funkcja oddziaływania układu napędowego na kierunek ruchu i stabilizację toru ruchu pojazdu jest w takich pojazdach łatwiejsza i tańsza w realizacji. Również inne znane systemy występujące we współczesnych samochodach, jak ABS, EBD i ASR mogą być (w pewnym zakresie skuteczności) prościej rozwiązane niż dotychczas. Wydaje się, że te wymienione i szerzej opisane w artykule cechy, oprócz powszechnie znanych względów ekologicznych, będą ważnym dodatkowym argumentem przemawiającym za upowszechnianiem napędów hybrydowych i elektrycznych w pojazdach.

Bibliography/Literatura

- [1] Avenatti R., Campo S., Ippolito L.: A rear active differential: Theory and practice of a new type of controlled splitting differential and its impact on vehicle behavior. GP C'98, Detroit, 1998.
- [2] Denzler R., Granzow C., Peter R., Spiess M.: Das Hinterachsgetriebe Vector Drive. Automobiltechnische Zeitschrift, nr 12, pp. 1106-1115, 2007.
- [3] Dzida J., Mesiti D.: Aktywny mechanizm różnicowy – nowa jakość w sterowaniu pojazdów. Zeszyty Naukowe OBR SM Bosmal, nr 21/I-II, Bielsko-Biała, s. 37-49. 2003.
- [4] Dzida J.: Stabilizowanie toru jazdy samochodu przy wykorzystaniu sił napędowych. Zeszyty Naukowe OBR SM Bosmal, nr 38/IV, Bielsko-Biała, s. 17-29, 2007.
- [5] Dzida J.: Mechanizmy rozdziału mocy w pojazdach. Rozprawa habilitacyjna. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała, s. 217, 2011.
- [6] Freimann R., Wolter T-M., Schneider E.: Driving dynamics and hybrid combined in the torque vectoring – Concepts of axle differentials with hybrid functionality and active torque distribution. Vehicle Dynamics Expo 2009, Stuttgart, 2009.
- [7] Smetana T., Biermann T., Rohe M., Heinrich W.: E- Drive with electrically controlled differential. ATZ autotechnology, nr 5, vol. 11, pp. 53-57, 2011.
- [8] Smetana T., Biermann T., Höhn B-R., Kurth F., Wirth C.: Schaeffler active eDifferential: The active differential for future drive trains. Schaeffler SYMPOSIUM 2010, pp.180-189, 2011.
- [9] www.autowallpaper.de
- [10] www.greencarcongress.com

Jan Dzida, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at University of Bielsko-Biała

Dr hab. inż. Jan Dzida – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej

