

Jan Dzida

Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała

PORÓWNANIE RÓŻNYCH SPOSOBÓW KIERUNKOWEGO NAPĘDZANIA POJAZDÓW SILNIKAMI ELEKTRYCZNYMI

THE COMPARISON OF DIFFERENT METHODS OF VECTOR DRIVE OF VEHICLES WITH ELECTRIC MOTORS

Streszczenie: W artykule omówiono ideę kierunkowego napędzania pojazdów i systemy ją realizujące (vector drive). W systemach takich oddziaływanie na kierunek ruchu pojazdu dokonuje się przez różnicowanie sił napędowych na kołach po jego lewej i prawej stronie. Opisano przykładowe aktywne mechanizmy różnicowe, które w pojazdach napędzanych silnikiem spalinowym są podstawowym elementem systemu. Wskazano na trudne do pokonania problemy tych konstrukcji, co skutkuje ich małą popularnością. W elektrycznych systemach napędowych, z uwagi na możliwość stosowania kilku silników napędowych, realizacja kierunkowego napędzania wydaje się łatwiejsza. Przedstawiono i poddano analizie kilka wariantów elektrycznych układów tego typu, takich jak: z aktywnym mechanizmem różnicowym zbudowanym z użyciem dwóch maszyn elektrycznych, z dwoma odrębnymi silnikami elektrycznymi do indywidualnego napędzania koła lewego i prawego oraz system zawierający walcowy mechanizm różnicowy, w którym na ruch obrotowy satelitów oddziałuje dodatkowy silnik sterujący. Podjęto próbę porównania wymienionych układów. Jako kryteria oceny przyjęto złożoność i koszt konstrukcji oraz problemy występujące w sterowaniu. W artykule została przedstawiona również koncepcja autora dotycząca nowego elektrycznego systemu napędzania kierunkowego. Celem tej propozycji jest osiągnięcie uproszczenia konstrukcji i obniżenie kosztu. W podsumowaniu wskazano, że stosunkowo łatwa realizacja kierunkowego napędzania w pojazdach elektrycznych i wynikająca stąd poprawa bezpieczeństwa, może być dodatkowym argumentem przemawiającym za ich upowszechnieniem.

Abstract: The article covers the issue of the vector drive of vehicles and systems of implementation. Such systems have the impact on the direction of motion of the vehicle achieved by varying the driving forces on the wheels to the left and right side. The active differentials, which are essential in vehicles powered by combustion engines were described. Insurmountable problems of these structures, resulting in their low popularity were also pointed out. In the electric drive systems, due to the possibility of using several drive motors, the implementation of vector drive seems to be easier. The article presents and analyzes several variants of the electrical systems of this type, such as: active differential constructed using two electric machines with two separate electric motors to drive the wheels of the left and right individually and a system comprising a cylindrical differential, wherein the rotary motion of satellites is affected by an additional engine control unit. Attempts to compare these systems were made. The evaluation criteria included complexity and cost of construction and problems in control. This article presents the author's concept on the new electric vector drive system. The aim of this offer is to achieve simplified design and reduction of costs. The summary indicated that relatively easy implementation of vector drive in electric vehicles and the resulting improvement in security could be an additional argument for their popularization.

Słowa kluczowe: układy napędowe pojazdów, napędy elektryczne i hybrydowe, sterowanie rozdziałem mocy, kierowność pojazdów

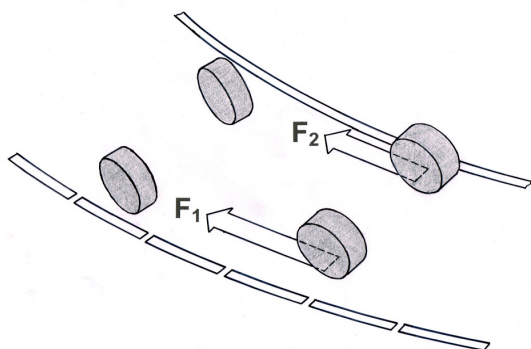
Keywords: vehicle drive systems, electric and hybrid drives, power distribution control, maneuverability of vehicles

1. Wprowadzenie

Wraz z powstaniem pierwszych pojazdów silnikowych pojawił się problem liczby kół napędzanych i wzajemnych powiązań między nimi. Szybko stwierdzono, że napędzanie więcej niż jednego koła w jednej osi może stwarzać problemy przy zakręcaniu. Jednak napędzanie większej liczby kół jest konieczne ze względu na właściwości trakcyjne pojazdu. Już w samo-

chodzie Benza z 1886 roku, zastosowano prosty mechanizm różnicowy, który już nie utrudniał zakręcania. Jednak jego wprowadzenie w niektórych warunkach ruchu pogarszało przeniesienie sił napędowych. Przez następne kilkadziesiąt lat próbowano tak udoskonalić jego konstrukcję, aby nie pogarszając kierowności dobrze wykorzystywał siły przyczepności oby-

dwu kół. Powstała duża ilość konstrukcji z tak zwaną „blokadą” lub o powiększonym tarciu wewnętrznym. Dopiero z końcem XX wieku pojawiło się nowe spojrzenie na funkcję mechanizmu różnicowego. Konstruktorom już nie wystarczy, że napędzanie kół nie utrudnia kierowania pojazdem. Oczekuje się czegoś więcej – napędzanie kół powinno wspomagać kierowanie pojazdem, a ściślej sprzyjać utrzymaniu zamierzonego kierunku ruchu. Powstały określenia kierunkowego lub wektorowego napędzania i nazwy systemów, które realizują takie zadanie, jak vector drive, czy torque vectoring. Ich zasada działania wydaje się dość prosta – trzeba różnicować siły napędowe na kołach pojazdu. W przypadku tylko dwóch kół napędzanych (na przykład w układzie 4x2) zadaje się różnicę wartości sił napędowych tylko na nich (rysunek 1), a w przypadku większej liczby osi napędowych siły można różnicować stronami, jak i w podziale na nie.



Rys. 1. Idea kierunkowego napędzania – różnej wartości siły napędowe wspomagają zakręcanie samochodu

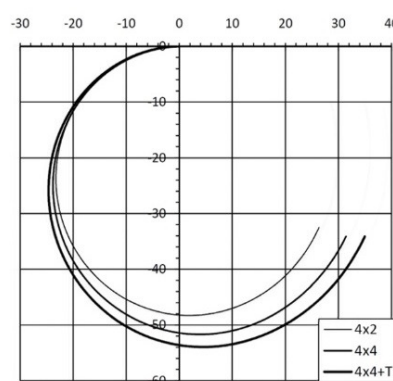
Analizując kierunkowe napędzanie pojazdów, warto określić, jakie daje ono korzyści. Według [2] samochód osobowy z takim systemem może uzyskać przyspieszenie poprzeczne o 1-1,5 m/s² większe w stosunku do tradycyjnie napędzanego, w tych samych warunkach. Oznacza to możliwość pokonania zakrętu z większą prędkością, albo po torze o mniejszym promieniu. Również badania autora [4] wykazały duży wpływ rozdziału sił napędowych na tor ruchu samochodu (rys. 2 a i b). Badany samochód miał możliwość napędzania kół w trzech trybach: napęd kół tylko przedniej osi (4x2), napęd kół przedniej i tylnej osi (4x4) oraz napęd czterech kół z tarcieniem wewnętrznym w tylnym mechanizmie różnicowym. Dla przejrzystości analiz, w niniejszym artykule zagadnienia kierunkowego napędzania ograniczono

do realizacji tej funkcji tylko w obrębie jednej osi napędowej.

a)



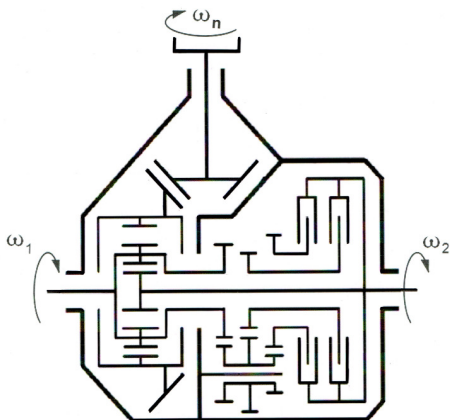
b)



Rys. 2. Widok prototypowego samochodu Cinquecento 4x4 podczas badań trakcyjnych (a) oraz tory jazdy dla stanów pracy układu napędowego 4x2, 4x4 i 4x4+T (b)

2. Systemy kierunkowego napędzania w pojazdach napędzanych silnikiem spalinywym

W pojazdach napędzanych silnikiem spalinowym mamy do czynienia z jednym źródłem napędu i do realizacji kierunkowego napędzania konieczne jest stosowanie specjalnych, tak zwanych aktywnych mechanizmów różnicowych. Może się wydawać, że kierunkowe napędzanie pojazdu jest jedynie pewną odmianą systemu ESP (Electronic Stability Program), gdzie podobny efekt uzyskuje się przez indywidualne sterowanie hamulcami kół. Jednak w przypadku sterowania siłami napędowymi proces jest pod względem technicznym znacznie trudniejszy. Aby różnicować siły napędowe na kole lewym i prawym, niezależnie od relacji ich prędkości obrotowych, trzeba stosować złożone układy mechaniczne. Na rysunku 3 przedstawiono schemat jednego z najwcześniejszych układów, zastosowany w samochodzie Mitsubishi Lancer evo VII [12].



Rys. 3. Schemat aktywnego mechanizmu różnicowego firmy Mitsubishi [12]

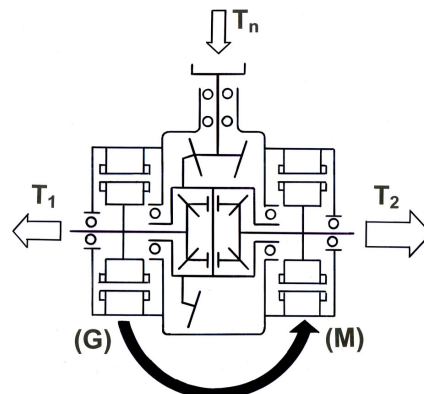
Zespół ten zawiera symetryczny walcowy mechanizm różnicowy, przekładnie przyspieszającą i zwalnającą prędkość obrotową jednej półosi (o ok. 10%) oraz wielotarczowe sprzęgła do włączania tych przekładni. Cała konstrukcja jest dość rozbudowana i w zasadzie przypomina dodatkową skrzynię przekładniową. W konsekwencji zespół aktywnego mechanizmu różnicowego jest cięższy i droższy od rozwiązań z tradycyjnych. Aktualnie na rynku występuje kilka działających podobnie rozwiązań takich systemów, które przez okresowe narzucanie określonego stosunku prędkości obrotowych półosi generują zróżnicowane siły napędowe na kołach. Konstrukcje takie są stosowane w niektórych samochodach wyższej klasy, jak: BMW X6, Audi A8, Porsche Cayenne, Honda Legend SH AWD i podobnych. Mimo wysiłku konstruktorów dotychczas nie udało się znacząco uprościć mechanizmów tego typu i ze względu na koszty nie są one stosowane w samochodach popularnych.

Aktualnie rozwój napędów elektrycznych umożliwia nowe podejście do konstrukcji układów przenoszenia mocy (na przykład [1]) i może również przyczynić się do upowszechnienia systemów vector drive. Szansy upatruje się w łatwości stosowania kilku silników elektrycznych zamiast jednego spalinowego, co może ułatwić to zadanie.

3. Aktywny mechanizm różnicowy zbudowany z użyciem dwóch maszyn elektrycznych

Mechanizm taki zaproponowała niemiecka firma IAV w ramach szerokich prac nad hybrydowymi układami napędowymi z funkcją vector drive [9]. Na rysunku 4 jest przedsta-

wiony schemat aktywnego zespołu napędowego osi, gdzie obok tradycyjnego mechanizmu różnicowego zastosowano dwie maszyny elektryczne mogące pracować przemiennie jako generatory lub silniki elektryczne.



Rys. 4. Schemat aktywnego mechanizmu różnicowego firmy IAV z dwoma maszynami elektrycznymi [9]

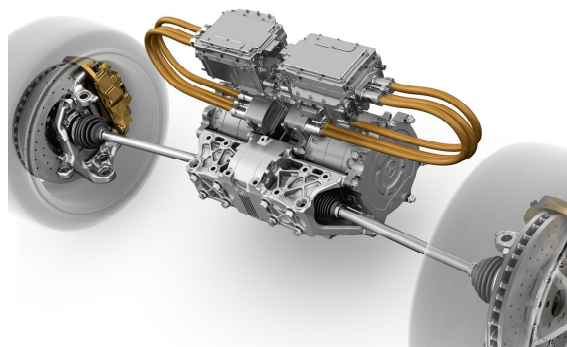
Symetryczny mechanizm różnicowy rozdziela w przybliżeniu równo momenty obrotowe na obydwie półosie. Jeżeli na lewej półosi maszyna elektryczna będzie pracować jako generator, to moment obrotowy doprowadzony do lewego koła zostanie zmniejszony o moment generatora. Równocześnie, jeżeli maszyna elektryczna na prawej półosi będzie pracować jako silnik, to nastąpi zwiększenie momentu napędowego na prawym kole. W takim trybie pracy układu uzyska się nierówne siły napędowe na kołach i zamierzony efekt kierunkowego napędzania pojazdu. Warto dodać, że możliwe jest „zamknięcie” energetyczne układu, to znaczy, że generator połączony osadzony na jednej półosi może zasilać silnik elektryczny na drugiej półosi. Dodatkową zaletą przedstawionego układu jest możliwość równoczesnej pracy obu maszyn elektrycznych jako silniki elektryczne lub generatory. W pierwszym przypadku otrzymuje się zwiększenie sił napędowych, a w drugim hamowanie obu kół i odzyskiwanie energii. Opracowany system w zasadzie był przeznaczony do samochodów napędzanych silnikiem spalinowym, ale może być wykorzystany również do rozdziału mocy dostarczonej przez główny silnik elektryczny. W tego typu konstrukcji występują jednak problemy wynikające z zamontowania maszyn elektrycznych bezpośrednio na półosiach, które najczęściej mają prędkości obrotowe w zakresie od 0 do około 1700 obr/min. Pociąga to za sobą konieczność stosowania wolnoobrotowych ma-

szyn elektrycznych o dużym momencie napędowym, a z tego wynikają duże wymiary i masa oraz konieczność intensywnego chłodzenia przy dużych obciążeniach prądowych.

4. Napędzanie każdego koła oddzielnym silnikiem elektrycznym

System napędzania kół pojazdu oddzielnymi silnikami elektrycznymi wydaje się dość oczywisty, bo wykorzystujący szczególne możliwości napędów elektrycznych. Aktualnie prace nad takimi rozwiązaniami idą w dwóch kierunkach. Pierwszym z nich jest próba zabudowania silników napędowych bezpośrednio w kole napędzanym. Firmy Michelin i Schaeffler zbudowały już takie zintegrowane koła, w których wewnątrz znajdują się elektryczne silniki napędowe. Dostępność takich rozwiązań na rynku ogromnie uprości konstrukcję samochodu, bo będzie on pozbawiony zespołów napędowych, a w niektórych wariantach konstrukcji kół, również elementów zawieszenia i hamulców. Jednak znaczny wzrost masy kół niekorzystnie wpływa na komfort i kierowność pojazdu i przyszłość tego typu napędu widzi się głównie w samochodach miejskich. Szersze zastosowanie może znaleźć napędzanie dwóch lub czterech kół oddzielnymi silnikami elektrycznymi umieszczonymi w podwoziu pojazdu. Przykładem konstrukcji samochodu elektrycznego, w którym każde koło napędza oddzielny silnik elektryczny, jest Mercedes Benz SLS AMG E-CELL (rys. 5) [8]. Łączna moc czterech silników elektrycznych wynosi 552 kW, a moment obrotowy 1000 Nm. Silniki osiągają prędkości obrotowe 13 000 obr/min, ważą 45 kg każdy i są zasilane z chłodzonych cieczą akumulatorów litowo-jonowych. Zastosowany system indywidualnego sterowania każdym silnikiem umożliwia wyjątkową dynamikę podłużną i poprzeczną samochodu. Firma podaje, że system optymalizuje zachowanie pojazdu na zakrętach, zmniejsza tendencję do nadsterowności i podsterowności, zmniejsza wymaganą siłę i kąt skrętu kierownicy oraz minimalizuje używanie hamulców i interwencje systemu ESP.

Osiągnięto optymalne wykorzystanie sił przyczepności opon do nawierzchni we wszystkich warunkach jazdy, zbliżając dynamikę jazdy do granic możliwości fizycznych. Jednak technicznym problemem w przedstawionym systemie kierunkowego napędzania jest konieczność bardzo dynamicznego sterowania całym zakresem mocy każdego silnika napędowego.



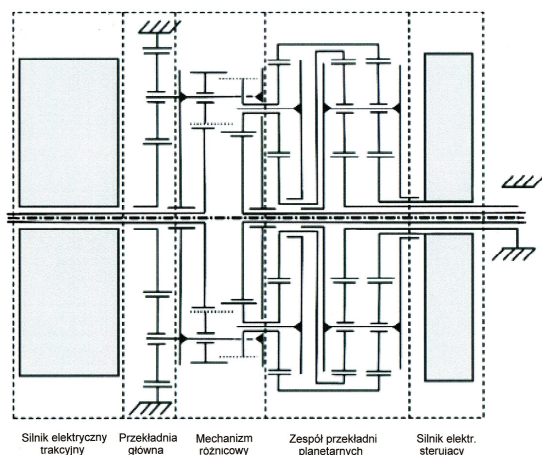
Rys. 5. Napędzanie kół oddzielnymi silnikami w samochodzie Mercedes Benz SLS AMG E-CELL [8]

Między innymi ta trudność jest przyczyną, że do kierunkowego napędzania popularnych samochodów elektrycznych poszukuje się innych rozwiązań.

5. Elektryczno-mechaniczny układ napędowy z mechanizmem różnicowym o sterowanym ruchu obrotowym satelitów

Idea działania systemu kierunkowego napędzania w tym układzie napędowym jest dość prosta. W większości pojazdów występuje międzykołowy mechanizm różnicowy i jeżeli udałoby się wymusić dodatkowym silnikiem ruch obrotowy jego satelitów, to można by osiągnąć efekt wspomagania lub osłabiania skrętu samochodu. Niestety od strony konstrukcyjnej realizacja tej idei jest dość trudna, ponieważ trzeba doprowadzić napęd do satelitów, które wykonują ruch krążący. Pewnym wzorcem do rozwiązania tego problemu wzorem mogą być konstrukcje stosowane w mechanizmach skrętu ciągników gąsienicowych [3,7]. Zespolony układ napędowy z realizacją funkcji vector drive opracowała firma Schaeffler (rys. 6) [10,11]. Na przedstawionym schemacie widać, że zespół napędzania kół jednej osi zawiera dwa silniki elektryczne: jeden stanowi napęd główny (o mocy 40, 50 lub 80 kW), a drugi (o mocy 5 lub 8 kW) służy do sterowania mechanizmem różnicowym i oddziaływania w ten sposób na kierunek jazdy samochodu.

W konstrukcji zastosowano walcowy mechanizm różnicowy, bo tylko w tym przypadku można stosunkowo łatwo, przez układ przekładni planetarnych, napędzać satelity. Obydwa silniki elektryczne są chłodzone cieczą.



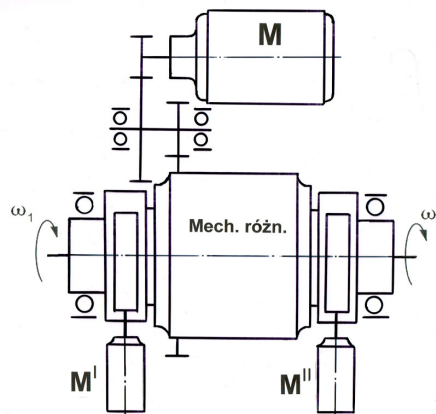
Rys. 6. Schemat elektryczno-mechanicznego systemu napędowego z funkcją vector drive firmy Schaeffler [10]

Zależnie od tego, czy chce się osiągnąć układ napędowy 4x2 lub 4x4, należy stosować jeden lub dwa takie zespoły napędowe w samochodzie. Niewątpliwą zaletą systemu jest to, że można już osiągnąć stan kierunkowego napędzania samochodu osobowego średniej klasy o układzie napędowym 4x2, sterując jednym silnikiem o mocy 5-8 kW. Firma Schaeffler sygnalizuje, że system ten będzie wprowadzony na rynek w elektrycznej wersji samochodu Skoda Octavia.

6. Próba oceny konstrukcji i propozycja autora w zakresie kierunkowego napędzania pojazdów

Opisanych kilka systemów realizujących funkcję kierunkowego napędzania porównywać można przy użyciu różnych kryteriów. Mogą to być: złożoność konstrukcji, masa, koszt, wartość mocy potrzebnej do sterowania oraz trwałość i niezmienność charakterystyki działania w okresie eksploatacji. Uwzględniając te kryteria wydaje się, że dotychczasowe rozwiązania współpracujące ze spalinowymi zespołami napędowymi spalinowymi są skomplikowane i drogie, a przez to mało przyszłościowe. W przypadku napędów elektrycznych, mimo pozornej łatwości zrealizowania kierunkowego napędzania, ciągle trwają poszukiwania dobrej koncepcji i konstrukcji, która znalazłaby szerokie zastosowanie. Autor uważa, że spośród przedstawionych systemów na szczególną uwagę zasługuje system elektryczno-mechaniczny, gdyż po raz pierwszy może on znaleźć zastosowanie w samochodach średniej klasy. Opierając się na wieloletnich własnych doświadczeniach

w czeniach w konstrukcji i badaniu mechanizmów rozdziału mocy [4,5,6,7] autor przychylił się do wyboru tego typu koncepcji i formułuje propozycję w tym zakresie. Ogólną koncepcję autorskiego rozwiązania przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Koncepcja autora elektryczno-mechanicznego systemu kierunkowego napędzania pojazdu

Jest to schemat elektryczno-mechanicznego zespołu napędowego kół jednej osi, który zawiera symetryczny mechanizm różnicowy i dwie przekładnie boczne do włączania dodatkowej więzi kinematycznej między obudową mechanizmu i półosiami, co umożliwi realizację kierunkowego napędzania. Odmiennością tej koncepcji, od ideowo pokrewnej przedstawionej na rysunku 2, jest przewidywane zastosowanie całkowicie nowego typu przekładni, nie zawierających kół zębatych. Przekładnie takie będą włączane do współpracy przez dwa silniki elektryczne niedużej mocy. Prace nad tym rozwiązaniem są już zaawansowane, ale pożądanymi są partnerzy chętni do udziału w jego dalszym rozwoju.

7. Uwagi końcowe

Systemy kierunkowego napędzania poprawiają dynamikę i kierowalność pojazdów podnosząc w ten sposób ich bezpieczeństwo czynne. Z tego powodu należy się spodziewać, że rozwój takich systemów i wprowadzanie do innych, niż tylko klas wyższych, grup samochodów, będzie stałą tendencją. Celowe jest zatem prowadzenie dalszych badań nad układami konstrukcyjnymi i systemami ich sterowania, zwłaszcza w przyszłościowych elektrycznych napędach pojazdów. Można się spodziewać, że z grupy różnych systemów, opisanych i zasygnalizowanych w niniejszym artykule, zostaną wygenerowane pewne standardy konstrukcyjne,

które będą obowiązywały przez wiele następujących lat coraz szerzej stosowanych pojazdów elektrycznych.

8. Literatura

- [1]. Adamczyk D., Wilk A.: Model dwuwirnikowej maszyny indukcyjnej w aspekcie elektromagnetycznego mechanizmu różnicowego. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* nr 4, 2015.
- [2]. 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.
- [3]. Dajniak H.: Ciągniki: teoria ruchu i konstruowanie. WKiŁ Warszawa, 1985.
- [4]. Dzida J.: Mechanizmy rozdziału mocy w pojazdach. Monografia. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała, 2010.
- [5]. Dzida J., Mesiti D.: Aktywny mechanizm różnicowy – nowa jakość w sterowaniu pojazdów. *Zeszyty Naukowe OBRSM Bosmal Bielsko-Biała*, nr 21/I-II, 2003.
- [6]. Dzida J.: Rozwój aktywnych mechanizmów różnicowych – systemy Torque Vectoring. *Zeszyty Naukowe OBRSM Bosmal Bielsko-Biała*, nr 45/I, 2010.
- [7]. Dzida J.: Możliwości i ograniczenia systemów oddziaływania siłami napędowymi na kierunek ruchu samochodu (Torque Vectoring). *Archiwum Motoryzacji*, nr 1, 2015.
- [8]. Davis J.: Mercedes-Benz SLS AMG E-Cell Drive System Revealed. www.mercedesbenz.com, March 2012.
- [9]. 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.
- [10]. Smetana T., Biermann T., Höhn B-R., Kurth F., Wirth C.: Schaeffler active eDifferential: The active differential for future drive trains. *Schaeffler SYMPOSIUM 2010*.
- [11]. Smetana T., Biermann T., Rohe M., Heinrich W.: E- Drive with electrically controlled differential. *ATZ autotechnology*, nr 5, vol. 11, 2011.
- [12]. www.mitsubishi-motors.com.

Autorzy

dr hab. inż. Jan Dzida, prof. ATH jest pracownikiem Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2.