

Grzegorz Ombach, Jacek Junak

Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. Kommanditgesellschaft, Wuerzburg, Germany

KIERUNKI ROZWOJU NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH W SAMOCHODACH OSOBOWYCH W ZAKRESIE MOCY DO 10kW

TRENDS IN AREA OF ELECTRIC DRIVES DEVELOPMENT IN POWER RANGE UP TO 10kW IN AUTOMOTIVE VEHICLES

Abstract: The decision of an electrical revolution in the automotive sector has been decided at the end of 2008, when the European Parliament passed legislation of lower CO₂ emissions of new cars. This causes and forces the development of alternative concepts of propulsion systems and alternative fuels. These new trends of propulsion technologies like hybrid and pure electric drive will have impact on the entire car design. In this paper an evolution of selected electromechanical components used in the car is presented. Analysis of electromechanical components can be divided in two groups: first one contains the currently used subsystems like e.g.: electric power steering system, engine cooling systems, etc. and the second one, presents the development of new components like e.g.: electric air-conditioning compressor and other by-wire technologies. Additionally the development and trends of new materials and technologies used in the electromechanical subsystems in the car are presented.

1. Wstęp

Rozwój w kierunku bardziej ekonomicznych “zielonych” samochodów został obecnie przyspieszony poprzez zaakceptowaną przez Parlament Europejski regulację obniżającą poziom emisji CO₂ oraz wzrastające ceny paliw [8]. Te procesy są motorem przyspieszonego rozwoju nowych technologii [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10] oraz alternatywnych rozwiązań takich jak:

- dalszy rozwój silników spalinowych oraz napędów hybrydowych,
- technologia stop-start,
- wprowadzenie hamowania odzyskowego,
- poprawa aerodynamiki,
- ograniczenie masy poprzez lekkie materiały,
- poprawa sprawności systemów elektromechanicznych, np.: elektryczne wspomaganie kierownicy, elektryczny kompresor do układu klimatyzacji, elektryczne pompy oleju, itp. oraz
- poprawa systemów transmisji.

Niektóre z powyższych rozwiązań technologicznych były już w przeszłości częściowo rozwinięte i zastosowane, np. samochód elektryczny, który najprawdopodobniej był wynalazcą Angosa Jedlitzky'ego. Tego typu samochody były bardzo popularne w USA na początku XX wieku. W tym czasie około 38% samochodów było napędzanych napędem elektrycznym. Koniec elektrycznej ery przyszedł

wraz z Pierwszą Wojną Światową, kiedy samochody z silnikami spalinowymi sprawdziły się znacznie lepiej w porównaniu do swoich elektrycznych odpowiedników. W tamtych czasach istniał ten sam problem, z którym boryka się przemysł samochodowy i dzisiaj: tj. stosunkowo mały zasięg, spowodowany słabo rozwiniętymi akumulatorami.

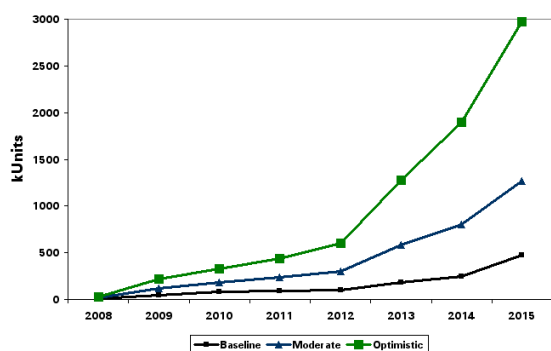
Następnym krokiem milowym było wprowadzenie do produkcji masowej w 1997 roku pierwszego samochodu z napędem hybrydowym: Toyota Prius. Ponad 18 tys. tych samochodów zostało sprzedanych w pierwszym roku.

Obecnie, powrót do samochodów elektrycznych jest faktem. Jedynym pytaniem na które szukana jest odpowiedź, to które rozwiązanie jest właściwe z ekonomicznego punktu widzenia. Istnieje wiele scenariuszy dotyczących technologii mających dominować w najbliższej przyszłości. Spodziewa się, że w ciągu następnych dziesięciu lat 12% produkowanych samochodów będzie wyposażonych w alternatywne technologie napędowe jak: hybrydy, napędy elektryczne oraz napędy elektryczne z powiększonym zasięgiem tzw. „range extender”.

Napęd w pełni elektryczny przyjmie się zapewne w sektorze małych samochodów miejskich z powodu ograniczonego zasięgu i w transporcie na terenach miejskich. Scenariusze dotyczące popytu na samochody z napę-

dem czysto elektrycznym zostały zaprezentowane na Rys. 1. Istnieją trzy typy prognoz:

- scenariusz podstawowy „Baseline”: aktualnie najbardziej prawdopodobny,
- scenariusz umiarkowany „Moderate”: bardziej optymistyczne prognozy dotyczące liczby conceptów technicznych dopuszczonych do fazy produkcji, np. sukces firmy Better Place,
- scenariusz optymistyczny „Optimistic”: prognozy przyjmujące best/case scenariusze dla przemysłu samochodów elektrycznych: wsparcie (subwencje) rządowe, nagły wzrost cen paliw i spadek cen akumulatorów.



Rys. 1. Popyt na samochody elektryczne, trzy scenariusze, (źródło: Strategy Analytics)

Na podstawie zaprezentowanych scenariuszy rozwoju popytu na samochody z napędem czysto elektrycznym spodziewana jest produkcja tych pojazdów na poziomie między 500 tys. do 3 mln sztuk w roku 2015.

Inne dodatkowe technologie muszą zostać rozwinięte na nowo. Jest oczywiste, że redukcja emisji CO₂ i/oraz ekonomiczne zużycie paliw mogą i muszą być osiągnięte poprzez jednoczesne wprowadzenie różnych technologii. To wymaga pewnych modyfikacji w aktualnych podsystemach elektromechanicznych, aby te stały się bardziej efektywne, lżejsze i mniejsze lub rozwoju nowych, lepszych podsystemów. Tego typu mechatroniczne systemy składają się z następujących komponentów: silnika elektrycznego, elektroniki, oprogramowania wymaganego do sterowania oraz komponentu mechanicznego, np. przekładni, pompy itp.

2. Wybrane opcje technologiczne redukcji emisji CO₂

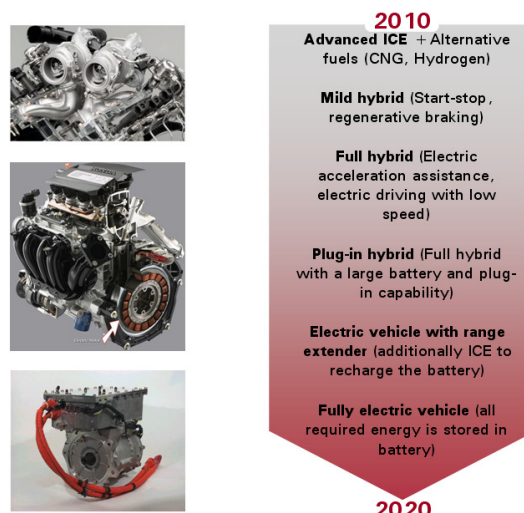
Istnieje wiele różnych technologii, które mogą zostać zastosowane w celu zwiększenia sprawności samochodu. Tabela nr 1 demonstruje

wpływ wybranych technologii na średnią redukcję emisji CO₂ [1, 6, 8].

Tabela 1. Średnia redukcja CO₂ w [%]

Technologia		% redukcji CO ₂
1	Podzespoły ze zmniejszonym tarcie	4.0
2	Poprawa aerodynamiki	3.0
3	Elektryczne wspomaganie kierownicy	4.5
4	Redukcja wagi	10.0
5	Technologia Stop-Start	3.5
6	Technologia Stop-Start z hamowaniem odzyskowym	7.0
7	Automatyczne sprzęgło	4.5
8	Nowe podzespoły elektromechaniczne, poprawa sprawności aktualnych podzespołów	7.0
9	Poprawa systemów bezpośredniego wtrysku paliwa	11.5
10	Napęd hybrydowy	7.0

Wiele zaprezentowanych powyżej technologii koncentruje się na zwiększonej elektryfikacji poszczególnych komponentów samochodu, prowadząc do w pełni elektrycznego pojazdu. Droga rozwoju systemów napędowych została zademonstrowana na Rys. 2



Rys. 2. Droga rozwoju elektryfikacji układów napędowych

Dla niektórych nowych technologii układów napędowych spodziewany jest spadek cen do 40 %. Porównanie wybranych systemów zawiera Tabela nr 2.

Tabela 2. Porównanie kosztów wybranych systemów napędowych w stosunku do spodziewanej redukcji w 2015 roku (źródło Roland Berger)

	Mild Hybrid	Serial Hybrid	Full Hybrid /Plug in	EV
E-Motor	~10-15kW	~100kW	~40-60kW	~60kW
Generator	No	~40kW	No	No
Inverter	100-160V	300-400V	300-600V	300-600V
Battery System	~1.5kWh	~8kWh	~2.5kWh	~20kWh
Cooling	Yes	Yes	Yes	Yes
Gearbox	Adjustment	1-stage	Adjustment	1-stage
ICE	No	Small	No	No
Prise Today	~3.000€	~10.000€	~4.800€	~17.000€
Prise Reduction in five years	-40%	-33%	-35%	-39%

Wszystkie zaprezentowane systemy napędowe wymagają zastosowania silnika elektrycznego o mocy od 10 do 100kW. Istnieje wiele różnych typów silników, które mogą być zastosowane. Ogólne ich porównanie przedstawione jest w Tabeli nr 3.

Niniejsze opracowanie koncentruje się na podzespołach elektromechanicznych w zakresie mocy do 10 kW. Część takich podzespołów, zademonstrowanych w Tabeli nr 1, np.: elektryczny system wspomagania kierownicy czy automatyczne sprzęgło, są obecnie w produkcji masowej. Inne rozwiązania, jak elektryczny kompresor do klimatyzacji, system Airgate® [9], nowe systemy x-by-wire, są aktualnie w trakcie rozwoju.

Każdy system elektromechaniczny ma trzy główne komponenty tj.: napęd, układ kontroli oraz sensory, przy czym niniejsze opracowanie koncentruje się przede wszystkim na pierwszym punkcie tj. części napędowej. Widoczną tendencją w tej dziedzinie jest zwiększone zastosowanie sterowania elektrycznego i rosnąca ilość silników elektrycznych lub innych elektromechanicznych przetworników.

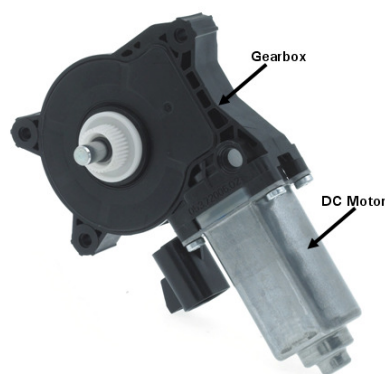
3. Ogólne kierunki rozwoju systemów elektromechanicznych w przemyśle samochodowym

We współczesnych samochodach obecnie wykorzystuje się od 30 do 150 systemów z silnikami elektrycznymi i systemami elektronicznymi. Zakres mocy tych systemów jest

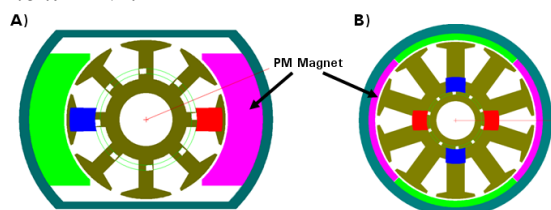
bardzo szeroki i sięga od kilku do kilkudziesięciu tysięcy watów. To szerokie spektrum wykorzystuje różne technologie w zakresie napędów, takie jak systemy z silnikami szczotkowymi prądu stałego z magnesami trwałymi oraz z silnikami bezszczotkowymi synchronicznymi (BLDC i BLAC) z magnesami trwałymi. Głównymi kierunkami rozwoju nowoczesnych systemów elektromechanicznych są: wysoka sprawność, redukcja wagi, dodatkowe funkcje i ograniczenie kosztów produkcji. Spełnienie tych wymagań jest możliwe, np. po wprowadzeniu silników z większą ilością biegunów (Rys. 4) i magnesami na bazie metali ziem rzadkich np. NdFeB, zastąpieniu silników szczotkowych silnikami synchronicznymi bezszczotkowymi (Rys. 6) oraz wykorzystaniu średniego napięcia zasilania.

3.1. Silniki szczotkowe ze zwiększoną ilością biegunów z magnesami na bazie metali ziem rzadkich

W samochodzie jest wiele silników o maksymalnej mocy wyjściowej w zakresie do 200W. Są one stosowane w systemach bezpieczeństwa i komfortu. Wybrany przykład zwiększenia komfortu jest napęd elektrycznego podnośnika szyb, gdzie silnik elektryczny jest zintegrowany z przekładnią mechaniczną oraz sensorem położenia wirnika (Rys. 3). Tego typu silniki są najczęściej dwubiegunowe szczotkowe z magnesami ferrytowymi. Głównym celem rozwoju tych systemów jest redukcja ich wagi i rozmiaru. Typowa waga takiego silnika z przekładnią mechaniczną waha się pomiędzy 400 a 500 gramów. Najprostszą metodą redukcji wagi i rozmiaru silnika jest zmiana jego geometrii (Rys. 4.A) i zastosowanie silniejszych magnesów ferrytowych np. klasy 9 lub 12. W ten sposób możliwe jest zredukowanie wagi i rozmiaru silnika elektrycznego do 20 %. Dodatkowa redukcja może być osiągnięta poprzez zmianę topologii silnika, np. Rys. 4.B, gdzie zaprezentowano czterobiegunowy silnik z izotropowym lub anizotropowym magnesem wtryskiwanym z ziem rzadkich. Taka zmiana umożliwia zredukowanie wagi i rozmiaru urządzenia do 50% [10]. Oszczędzanie wagi poszczególnych komponentów nabiera na znaczeniu wraz ze wzrostem liczby takich komponentów w samochodzie, typowy pojazd posiada dzisiaj około 60 podobnych systemów.



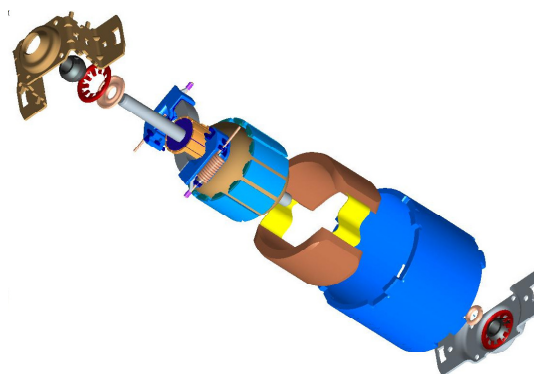
Rys. 3. Napęd do podnoszenia szyb, max moment 12Nm



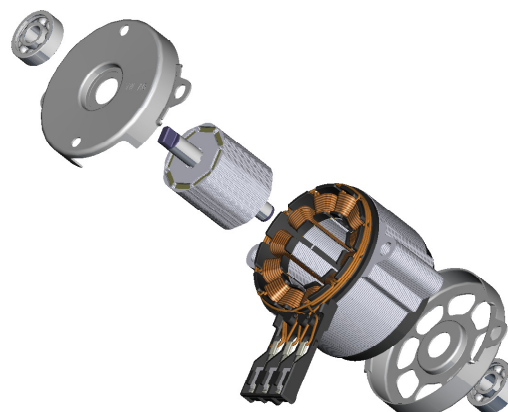
Rys. 4. Przekrój silnika szczotkowego do podnoszenia szyb, A) dwupolowy z ferrytami, B) czteropolowy z NdFeB

3.2. Tendencja w kierunku podzespołów elektromechanicznych z zastosowaniem technologii silników bezszczotkowych

W samochodzie niektóre systemy elektromechaniczne są używane bardzo rzadko, np. sterowanie fotela; inne, jak np. elektryczne wspomaganie kierownicy, są praktycznie w ciągłym użyciu. Na tej zasadzie możliwa jest klasyfikacja elektromechanicznych systemów w samochodzie na dwie grupy. W pierwszej grupie, gdzie okres eksploatacji jest ograniczony do kilkuset godzin oraz maksymalna moc wyjściowa osiąga około 400W. Tego typu systemy wykorzystują tanią technologię silników szczotkowych i bardzo proste zespoły sterowania elektronicznego. Druga grupa systemów elektromechanicznych, gdzie techniczny okres eksploatacji osiąga kilka tysięcy godzin, charakteryzuje moc wyjściowa w zakresie od 200 do 6000 W. W tej grupie wykorzystywana jest bardziej zaawansowana technologia silników bezszczotkowych, zazwyczaj trójfazowych. Kompleksowe porównanie tych dwóch grup jest zawarte w Tabeli nr 3 oraz na Rys. 5 i 6.



Rys. 5. Komponenty w technologii silników szczotkowych



Rys. 6. Przekrój silnika bezszczotkowego IPM wykorzystanego w systemie automatycznego sprzęgła, moc znamionowa 250W

Na podstawie Rys. 6 można zaobserwować, że silnik bezszczotkowy składa się zasadniczo z mniejszej ilości części w porównaniu z silnikiem szczotkowym, Rys. 5.

3.3. Zastosowanie wyższych napięć

Nowe rodzaje samochodów, takie jak hybrydowe lub elektryczne, które wykorzystują wyższy poziom napięcia (100V-800V) w porównaniu do standardowych pojazdów (12V), otwierają nowe możliwości do poprawienia sprawności podzespołów elektromechanicznych [11]. Zwiększenie poziomu napięcia pozwala ograniczyć straty na połączeniach pomiędzy akumulatorem, elektroniką i silnikiem elektrycznym oraz w samej elektronice. Uzyskana w ten sposób wyższa sprawność systemu może być użyta do redukcji pobieranej mocy z akumulatora o około 25 %, lub do redukcji wagi i rozmiaru silnika elektrycznego o około 25 % [5, 11].

Tabela nr 3. Porównanie technologii silników szczotkowych i bezszczotkowych stosowanych w przemyśle samochodowym

Technologia szczotkowa	Technologia bezszczotkowa
Techniczny okres eksploatacji silnika ograniczony przez szczotki (do 1000 godzin)	Techniczny okres eksploatacji silnika ograniczony jedynie poprzez własną wytrzymałość, głównie łożysk (ponad 6000 godzin)
Stały kąt komutacji, regulacja poprzez zmianę napięcia	Płynna regulacja charakterystyką wyjściową silnika, lepsza dynamika silnika – mniejszy moment bezwładności wirnika
Gorsze właściwości cieplne, słaba wymiana ciepła pomiędzy wirnikiem i obudową	Lepsze właściwości cieplne, dobra wymiana ciepła pomiędzy statorem i obudową
Wysoki poziom wibracji i hałasu (problemy z wibracją szczotek)	Niższy poziom wibracji i hałasu w porównaniu do silników szczotkowych
Problemy z kompatybilnością elektromagnetyczną z powodu mechanicznej komutacji	Brak problemów z kompatybilnością elektromagnetyczną z powodu mechanicznej komutacji
Mniejsze koszty elektroniki	Wyższe koszty elektroniki (np. 6xMOSFET, sensor pozycji rotora)
Niski koszt silnika: a) magnesy ferrytowe b) prosta technika nawijania „flyer winding” c) prosta obudowa	Wysoki koszt silnika: a) magnesy z ziem rzadkich b) skomplikowany sposób nawijania „Needle/single tooth winding” c) stator i rotor z pojedynczych blach oraz dodatkowa obudowa

4. Rozwój wybranych podzespołów elektromechanicznych dla przemysłu samochodowego

Rozwój wielu nowych technologii przedstawionych w rozdziale 3 ma na celu zwiększenie sprawności systemu i redukcję poziomu emisji CO₂, Tabela nr 1. W ciągu ostatniej dekady wiele systemów hydraulicznych zostało wyeliminowanych i zastąpionych systemami elektromechanicznymi, np. układ wspomagania kierownicy, pompa wodna i oleju. Tego typu rozwiązania są mniejsze i lżejsze w porównaniu do swoich poprzedników. Zastosowanie silników elektrycznych umożliwia redukcję strat i poprawia oszczędność paliwa, i co za tym idzie redukcję poziomu emisji CO₂. Wszystko to staje się możliwe, ponieważ silnik pracuje tylko wtedy kiedy jest potrzebny, a podzespoły elektromechaniczne charakteryzują się wyższą sprawnością w porównaniu do hydraulicznych [2, 4, 7]. Jednocześnie z podniesieniem sprawności zostały wprowadzone pewne dodatkowe

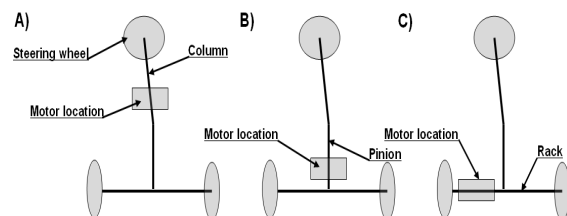
udogodnienia, jak redukcja poziomu hałasu i właściwości podnoszące komfort użytkownika. Wybrane nowe technologie obejmują:

- elektryczny system wspomagania kierownicy,
- półautomatyczna i automatyczna skrzynia biegów,
- elektryczny kompresor do układu klimatyzacji.

4.1. Elektryczny system wspomagania kierownicy

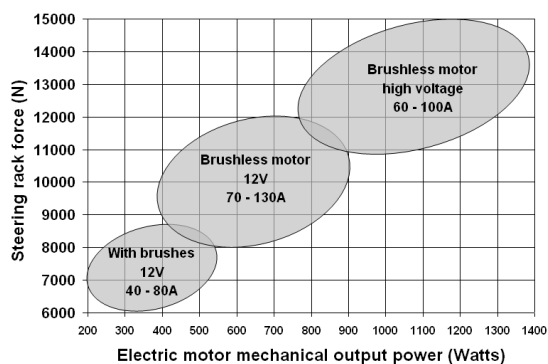
Aktualnie elektryczne systemy wspomagania kierownicy (electric power steering – „EPS”) znajdują coraz szersze zastosowanie. Systemy tego typu wymagają mechanicznego połączenia pomiędzy kierownicą a mechanizmem zwrotniczym. Silnik elektryczny wraz z elektroniką może być umieszczony w jednej z trzech możliwych pozycji, Rys. 7. Kolejnym rozwinięciem elektrycznego wspomagania kierownicy będzie jego odpowiednik, w którym nie będzie mechanicznego połączenia, tzw. „steer by wire”.

Wymagana moc w zakresie 600W do 1.5kW wymaga zastosowania silników o wysokiej sprawności. Główna część strat powstaje w miedzi, w uzwojeniach silnika, co powoduje nagrzewanie się silnika.



Rys. 7. Systemy elektrycznego układu wspomagania kierownicy A) „Column type”, B) „Pinion type” and C) „Rack type”

Poprawę sprawności silnika można osiągnąć w dwojaki sposób. Pierwszym jest minimalizacja rezystancji silnika, co ma jednak negatywny wpływ na jego wielkość, drugi sposób polega na redukcji prądu fazowego, co wymaga podniesienia napięcia zasilania, jak pokazano na Rys. 8. Widoczna jest tu także zależność mocy silnika w stosunku do wielkości pojazdu.



Rys. 8. Moc silników elektrycznych w zależności od wymaganej siły wspomagania

4.2. Półautomatyczna i automatyczna skrzynia biegów

Zautomatyzowanie skrzyni biegów tzw. (automated manual transmission - „AMT”) zaczyna być powszechnie stosowane w przemyśle samochodowym. Systemy tego typu eliminują potrzebę instalowania pedału sprzęgła, które kierowca w przeciwnym wypadku musi wciśnąć przy zmianie biegu. Sprzęgło jest włączane przez sterowanie elektroniczne wraz z silnikiem elektrycznym, co redukuje czas potrzebny do szybkiej i łagodnej zmiany biegu. Rozwiązanie tego typu pozwala zredukować straty momentu, wpływa pozytywnie na ekonomiczność zużycia paliwa, redukując jednocześnie poziom emisji CO₂.

Ponieważ przestrzeń dla silnika elektrycznego w systemie AMT jest ograniczona, powinien on się charakteryzować wysoką gęstością mocy i sprawnością. Jedynie silniki wykorzystujące magnesy stałe mogą spełnić takie wymagania, co sprawia, że są najbardziej odpowiednie do zastosowań w przemyśle samochodowym. Przykład silnika elektrycznego wykorzystanego w systemie AMT jest przedstawiony na Rys. 6. Tego typu silnik bezszczotkowy ma około 250W mocy mechanicznej.

4.3. Elektryczny kompresor do układu klimatyzacji

Nowo wprowadzoną technologią w przemyśle samochodowym jest kompresor elektryczny. Tego rodzaju nowy system jest stosowany przede wszystkim w pojazdach o napędzie hybrydowym (HEV) i samochodach elektrycznych (EV), gdzie napięcie z akumulatorów jest większe od 120V. Kompresor elektryczny umożliwia funkcjonowanie układu klimatyzacji również w czasie tymczasowego postoju (kiedy silnik zostaje wyłączony w celu oszczędzania

zużycia paliwa i zmniejszenia emisji CO₂, np. start-stop). Kompresor elektryczny pomaga zachować komfort w kabinie samochodu, jednocześnie umożliwiając zmniejszenie poziomu zużycia paliwa, hałasu i emisji CO₂. Zastosowane w takim systemie urządzenie to sinusoidalny synchroniczny silnik bezszczotkowy z magnesami na bazie metali z ziem rzadkich, np. NdFeB, o prędkości między 6000, a 10000 rpm. Typowa moc wyjściowa to 5kW. System ten charakteryzuje się bardzo niskim poziomem wibracji (ze względu na konstrukcję) oraz hałasu.

5. Tendencje w dziedzinie metod symulacji wykorzystywanych w rozwoju podzespołów elektromechanicznych w przemyśle samochodowym

Przemysł samochodowy stoi wobec ciągle rosnącego wymagania redukcji okresu rozwoju i przyspieszenia wprowadzania technicznych nowości na rynek. Dodatkowo stosowane tu systemy elektromechaniczne charakteryzują się wysokim stopniem złożoności. To wymaga korzystania z wirtualnych narzędzi rozwoju przy projektowaniu systemów z maszynami elektrycznymi. Celem jest wykorzystanie metod numerycznych, które umożliwią redukcję czasu symulacji oraz zagwarantują dokładność na poziomie co najmniej 95%. Tak zwany rozwój wirtualny musi uwzględniać różne dyscypliny takie jak:

- elektromagnetyzm,
- symulacje obwodowe elektroniki wraz ze sterowaniem,
- zagadnienia cieplne i przepływu,
- obliczenia mechaniczne statyczne,
- obliczenia mechaniczne dynamiczne,
- wibrację oraz obliczenia hałasu.

W związku z elektryfikacją układu napędowego wzrastają wymagania związane z poziomem hałasu pochodzącym od systemów dodatkowych. To wymaga wykorzystywania kompleksowych metod, które umożliwią przewidywanie wibracji oraz hałasu urządzenia elektromechanicznego. Jest to możliwe przy zastosowaniu metod symulacyjnych łączących wiele dyscyplin np. programy Simplorer® wraz z programami elementów skończonych np. Maxwell lub Ansys®.

Właściwe wykorzystanie możliwości tego typu programów umożliwia redukcję czasu przeznaczonego na rozwój, co wpływa na redukcję

kosztów. Przewiduje się, że od roku 2015 rozwój funkcji nowych systemów przedstawionych w niniejszym opracowaniu będzie się odbywał wyłącznie w sposób wirtualny.

6. Podsumowanie

Nie jest pytaniem kiedy, tylko jak szybko nastąpi elektryfikacja samochodów. Nowe sposoby napędowe są w trakcie dynamicznego rozwoju. Przewiduje się, że w 2015 roku ponad 3 miliony nowo produkowanych samochodów będzie samochodami w 100% elektrycznymi. Pozostałe 95% to nadal samochody z napędem tradycyjnym, który będzie stale ulepszany w celu poprawy oszczędności paliwa. Oba kierunki rozwoju układów napędowych wymuszają rozwój dodatkowych układów elektromechanicznych wykorzystywanych w samochodach. Główne kierunki to: miniaturyzacja, zastąpienie układów mechanicznych oraz hydraulicznych układami elektromechanicznymi, wykorzystanie średnich napięć w celu redukcji strat. Wszystko to wymaga bardziej kompleksowych metod symulacji, które umożliwiają skrócenie czasu przeznaczonego na rozwój.

7. Literatura

- [1]. H. Murakami, H. Kataoka: "Highly Efficient Brushless Motor Design for an Air-conditioner of the Next Generation 42V Vehicle", IEEE Trans. on Mag. 2001.
- [2]. Y. Kozaki, G. "Hirose: Electric power steering (EPS)", Motion & Control No. 6 -1999.
- [3]. Z. Q. Zhu, D. Howe: „Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles“, IEEE Vol. 95, No. 4, April 2007.
- [4]. G. Ombach, J. Junak, A. Ackva: "Comparison of Windings and Rotors Types of PM Brushless Motor for an Electric Power Steering Application", The 2006 International Conference on Electrical Machines and Systems, Japan 20-23.
- [5]. G. Ombach: "Comparison of electric power steering systems with PM machine used in hybrid vehicle with two different on-board voltage levels", EVER 2009, Monaco.
- [6]. E. A. Bretz: "By -Wire Cars Turn the Corner", IEEE Spectrum April 2001
- [7]. P. Campbell: "System Cost Analysis for an Interior Permanent Magnet Motor", AMES Laboratory IS-5191, August 2008.
- [8]. SMMT: "New car CO₂ report 2009", London March 2009.
- [9]. R. Kretschmer: "Boosting vehicle efficiency by optimizing cooling management", OEM&Lieferant, Januar 2010.
- [10]. Y. Honkura: "Automotive Motor Innovation With Anisotropic Bonded Magnet" Journal of

Iron and Steel Research, International, Volume 13, Supplement 1, 2006, Pages 231-239.

[11]. G. Ombach: "Electromechanical system with IPM motor used in electric or hybrid vehicle", Compel Vol. 30 Iss: 1, pp.137 – 150, 2011.

Autorzy

Grzegorz Ombach was born in Poland in 1972. He received electrical engineering degree (M.Sc. Eng.) from the Technical University of Lodz (Bielsko-Biala) in 1996. From 1996 to 2001 he was Assistant in the Institute of Theoretical and Industrial Electrotechnics, Group of Power Electronics, Silesian University of Technology in Gliwice, Poland. In 2001 he completed with honors Ph.D and he became Assistant Professor in the same Institute. From 2002 he was electromagnetical designer in the Siemens VDO Automotive AG, Electric Motor Drives in Würzburg, Germany. He designed new motors for electric power steering applications, hybrid vehicle, ABS and AMT (Automated manual transmission). From 2006 he is a leader of group of experts responsible for design of electric motors for automotive applications. From 2008 he was a head of simulation group in area of electric motors by Brose in Würzburg Germany. From beginning of 2010 he is a director of advanced development drives by the same company. g.ombach@ieee.org

Jacek Junak received M.Sc. degree in electrical engineering from the Technical University of Gliwice in Poland in 1993. From 1993 to 2001 he worked in the Group of Power Electronics at that University and in 2001 he completed with honours Ph.D. From 2002 to 2004 he worked for Rostock University in Germany taking part in the project for Max-Planck Institute. From 2004 to 2008 he is development engineer at Siemens VDO Automotive in Würzburg, Germany and from 2008 expert at Brose GmbH, Würzburg, Germany. He develops permanent magnet DC motors and systems for automotive industry. His professional interests concern: DC motor design, power electronics, computational electromagnetism and application of numerical methods. jacek.junak@brose.com